

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
VSB - Technical university of Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Faculty of Metallurgy and Material Engineering

Katedra materiálového inženýrství
Department of Material Engineering



STANOVENÍ NAPĚŤOVĚ DEFORMAČNÍHO CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ PRO ENERGETIKU

DETERMINATION OF STRESS-STRAIN BEHAVIOUR OF MATERIALS FOR POWER INDUSTRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Klára Kuchaříková
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Martin Kraus, Ph.D.
SUPERVISOR

OSTRAVA 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Klára Kuchaříková**
Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911T031 Diagnostika a design materiálů
Téma: Stanovení napětově deformačního chování materiálů pro energetiku
Determination of stress-strain behaviour of materials for power industry

Zásady pro vypracování:

Teoretická část:

- napětově deformační chování ocelí
- specifika materiálů pro energetiku
- způsoby mechanického zkoušení konstrukčních materiálů: zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu, typy měření tvrdosti
- instrumentovaná tvrdost

Experimentální část:

- vyhodnocení tahových zkoušek materiálů po dlouhodobé provozní expozici
- měření instrumentované tvrdosti na obsáhlém souboru vzorků
- vyhodnocení korelace výsledků

Diskuze

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Tabor, D. The hardness of metals, Oxford : Clarendon Press, 2000, 175 s., ISBN 0-19-850776-3
[2] Pharr, G.M. Measurement of Mechanical Properties by Ultra-low Load Indentation. Materials Science & Engineering A, 253 (1998), 151-159.
[3] Matocha, K. Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů - Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010 - 73 s., ISBN 978-80-248-2223-5

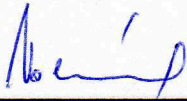
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

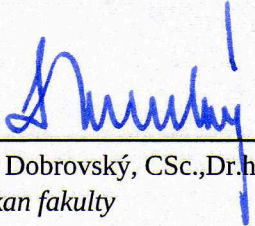
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Kraus, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 10.05.2013




prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 5. Obsah DP |
| 2. Zásady pro vypracování DP | 6. Textová část DP |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání DP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za titulním listem. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP.

V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah DP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý – 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Diplomová práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2012/2013.

Ostrava 30. 11. 2012

Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajovy.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracovala samostatně.

V Ostravě: 10.5.2013

Klára Kudrinská
podpis (jméno a příjmení studenta)

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Martinu Krausovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultace, které mi byly poskytnuty při vypracování této diplomové práce. Také bych ráda poděkovala Ing. Janu Brumkovi, výzkumnému pracovníkovi Centra pokročilých inovačních technologií VŠB - TU Ostrava, za cenné rady a velkou pomoc při realizaci výpočtové a výzkumné části této práce. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat také Ing. Martinu Příkazskému, bývalému pracovníku Centra pokročilých inovačních technologií VŠB - TU Ostrava, za pomoc při přípravě vzorků a při měření indentačních zkoušek.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá stanovením napětově deformačního chování materiálů pro energetiku a to s využitím indentační instrumentované metody. V teoretické části práce jsou popsány základní informace o napětově deformačním chování ocelí a materiálů pro energetiku. Dále jsou vzpomenuty standardní zkoušky mechanických vlastností a poslední podstatnou kapitolu teoretické části práce tvoří instrumentovaná tvrdost. Na část teoretickou navazuje část experimentální, která obsahuje dodatečné teoretické informace z indentační instrumentované metody a především vyhodnocení a stanovení napětově deformačních charakteristik.

Klíčová slova: Instrumentovaná indentační zkouška, napětově deformační chování, materiály pro energetiku, mechanické vlastnosti materiálu, pevnostní charakteristiky, jednoosá tahová zkouška.

ABSTRACT

This thesis deals with determination of stress-strain behaviour of materials for power industry with using of instrumented indentation method. In teoretical part there are described basic informations about stress-strain behavior of steels and materials for power industry. The following are mentioned standard tests of mechanical properties and last substantive chapter of the teoretical part is instrumented hardness. The teoretical part is followed by experimental part, which contains additional teoretical informations of instrumented indentation method and especially evaluation and determination of stress-strain characteristics.

Keywords: Instrumented indentation test, stress-strain behaviour, materials for power industry, mechanical properties of the material, strength characteristics, uniaxial tensile test.

OBSAH

Úvod.....	10
1 Napět'ově deformační chování ocelí	11
2 Materiály pro energetiku.....	14
2.1 Základní degradační procesy materiálů pro energetiku	14
2.1.1 Creep	14
2.1.2 Vysokoteplotní koroze	16
2.1.3 Popouštěcí křehkost.....	17
2.2 Konkrétní materiály pro energetické využití.....	17
2.2.1 Rozdělení žárupevných materiálů	18
2.2.1.1 Nelegované oceli	18
2.2.1.2 Nízkolegované oceli.....	19
2.2.1.3 Vysokolegované oceli	20
2.2.1.4 Austenitické oceli.....	21
2.2.2 Tepelné zpracování žárupevných ocelí	21
2.2.3 Svarový spoj žárupevných ocelí	22
3 Způsoby mechanického zkoušení konstrukčních materiálů	23
3.1 Zkoušky statické	23
3.1.1 Zkouška tahem.....	24
3.2 Zkoušky dynamické.....	29
3.2.1 Zkouška rázem v ohybu	29
3.3 Zkoušky tvrdosti.....	30
3.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella	32
3.3.2 Zkouška tvrdosti podle Meyera	34
3.3.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	34
3.3.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	35
3.3.5 Zkouška tvrdosti podle Knoop.....	36
4 Instrumentovaná indentační metoda měření tvrdosti	37
4.1 Hertzova teorie elasticity	40

<i>4.2 Základní podmínky Taborovy teorie elasticko - plastického chování materiálů</i>	<i>42</i>
<i>4.3 Teorie výpočtů mechanických vlastností z instrumentovaného indentačního testu ...</i>	<i>42</i>
5 Experimentální část.....	47
<i>5.1 Měření instrumentované tvrdosti na obsáhlé provozní expozici</i>	<i>47</i>
<i>5.1.1 Příprava vzorků.....</i>	<i>47</i>
<i>5.1.2 Popis zkušebního zařízení a samotného měření tvrdosti.....</i>	<i>47</i>
<i>5.1.3 Popis vybraných komponent k určení napětově deformační charakteristiky.....</i>	<i>48</i>
<i>5.2 Vyhodnocení tahových zkoušek materiálů po dlouhodobé provozní expozici</i>	<i>50</i>
<i>5.3 Vyhodnocení výsledků indentační instrumentované metody.....</i>	<i>53</i>
6 Závěr.....	59
Literatura	60
Seznam použitých symbolů a značek.....	64
Seznam obrázků	67
Seznam tabulek.....	69

Úvod

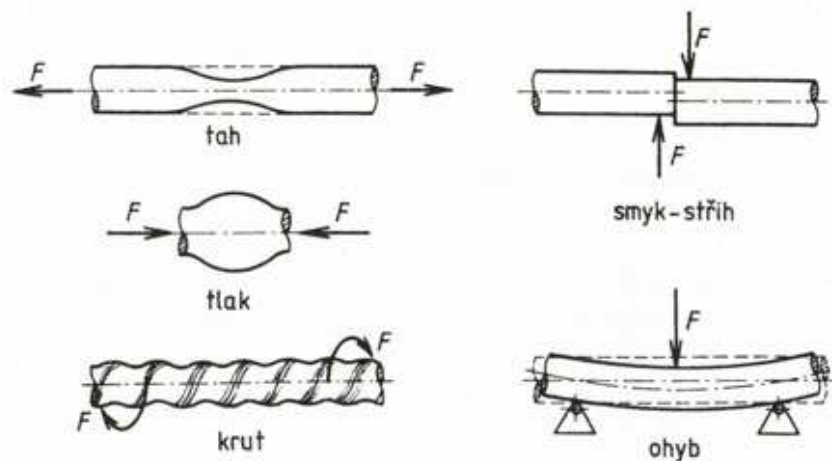
Stanovení napětově deformačního chování materiálů a dalších mechanických vlastností, je v energetickém průmyslu obzvlášť důležité. Znalost těchto vlastností je důležitá jak z hlediska návrhu nejvhodnějšího materiálu pro danou komponentu, tak především z hlediska pravidelné kontroly vysoce namáhaných částí zařízení. Taková zařízení pracují ve velmi složitých provozních podmínkách, kdy musí odolávat různým chemickým prostředím, vysokému provoznímu namáhání i vysokým teplotám, po dobu i několika desítek let. Pravidelnou kontrolou a včasným odhalením degradující části konstrukce, lze předcházet především selhání spolehlivosti provozovaného zařízení, či dokonce možné katastrofě. Aby se zamezilo částečné či úplné ztrátě funkční schopnosti konstrukce, při jejím dalším provozování, musí se provádět pravidelné kontroly. Pravidelnými kontrolami komponent energetických zařízení, se předchází možné vzniklé finanční ztrátě, způsobené opravami či odstavením zařízení, ale také a především dochází k eliminaci možných ztrát na lidských životech!

Cílem této práce je určení napětově deformačního chování ocelových vzorků z energetických zařízení a to s využitím metody instrumentované indentační zkoušky. Tyto testy budou prováděny na rozsáhlém souboru vzorků energetických komponent, tlakového systému klasické elektrárny. Všechny vzorky jsou po dlouhodobé provozní expozici a jsou na nich již provedeny trhací zkoušky, jejichž výsledky jsou k dispozici. Tato práce by měla také prokázat reprezentativnost korelace mezi výsledky napětově deformačního chování naměřenými pomocí jednoosé tahové zkoušky a výsledky naměřenými pomocí metody instrumentované tvrdosti. Hlavním mechanickým parametrem při porovnání této korelace, by měla být hodnota meze kluzu. Prokázání této korelace rozhodně neznamena náhradu tahových zkoušek jako takových, přesto metoda instrumentované indentační zkoušky může mít své opodstatnění především tam, kde je nedostatek materiálu pro výrobu vzorků či tam, kde je nedostatek času na provádění zdlouhavých mechanických zkoušek.

1 Napětově deformační chování ocelí

Tato kapitola bude velice ve zkratce zaměřená především na základní pojmy, týkající se napětově deformačního chování a mechanických vlastností materiálu.

Základní pojem při určování napětově deformačního chování je namáhání. Namáhání představuje interakci mezi silami a namáhaným tělesem a může být rázu fyzikálního, tepelného, chemického či mechanického. Při působení určitého namáhání na materiál, dochází k výkazu specifických mechanických vlastností, kterými jsou např. pevnost, pružnost, plasticita, tvrdost, tvárnost či houževnatost. Namáhání, které tyto vlastnosti způsobují jsou tah, tlak, ohyb, střih a krut (*obr.1.*), které mohou působit i vzájemně jako např. tah s ohybem či tah s ohybem a krutem [1]. Znalost těchto vlastností je důležitá z hlediska návrhu komponent či určení jejich funkční životnosti a spolehlivosti, která je dána mezním stavem. Mezní stav značí neschopnost konstrukce plnit funkci, ke které byla určena a je dán jak vnějšími (tvar, rozměry, teplota atd.), tak vnitřními faktory (chemické složení, struktura materiálu, provozní degradace atd.) [2]. Mezi mezní stavy patří např. nadměrné opotřebení, křehký či tvárný lom., creep atd.



Obr.1. Základní druhy mechanického namáhání [1].

Při namáhání součásti dochází buď k dočasné či trvalé změně deformace. Pod pojmem deformace ε si lze představit změnu tvaru či objemu tělesa, způsobenou vzájemnou změnou poloh atomů při silovém působení [3]. Dočasné změně odpovídá elastický stav a trvalé deformaci stav plastický. Elastický stav si lze představit jako pružnou deformaci, kdy se při odlehčení působících sil na těleso, materiál vrací do svého původního stavu, bez větších materiálových změn. Trvalá deformace pak představuje plastický neboli nepružný stav, který

v tělese přetrvává i po odlehčení vnějších sil a takové těleso má trvale porušenou vnitřní strukturu. Součtem dočasné a trvalé deformace se pak určí deformace celková, která je typická pro všechny materiály. Např. u konstrukčních materiálů převládá ve větší míře deformace pružná. Deformaci lze dále rozdělit podle způsobu namáhání vnějšími silami na deformaci tahem, tlakem, ohybem, krutem a smykem (*obr.1.*).

Kromě vnějších sil může deformaci způsobit i vnitřní (reziduální) napětí I. druhu. Zbytková napětí v tělese nejsou v tomto případě v rovnováze s vnějším zatížením, což se také může projevit na změně tvaru či objemu tělesa [3].

S namáháním a deformací bezesporu souvisí i napětí. Lze jej vyjádřit jako míru vnitřních sil, které v materiálu vznikají při pružné deformaci vlivem zatěžování vnějšími silami. Číselně pak lze u jednoduchých stavů napjatosti, napětí pro tah či tlak vyjádřit podle vzorce (1), pro střih je určen vztah (2), napětí při zatěžování součástky v ohybu lze vyjádřit rovnicí (3) a napětí v krutu vztahem (4) [1]:

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

kde P je síla deformující těleso [N];

S je průřez tělesa, který je kolmý k zatěžující síle [mm^2].

$$\tau = \frac{P}{S_{II}} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

kde S_{II} je průřez tělesa rovnoběžný s působící silou [mm^2].

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

kde M_o je ohybový moment [Nmm];

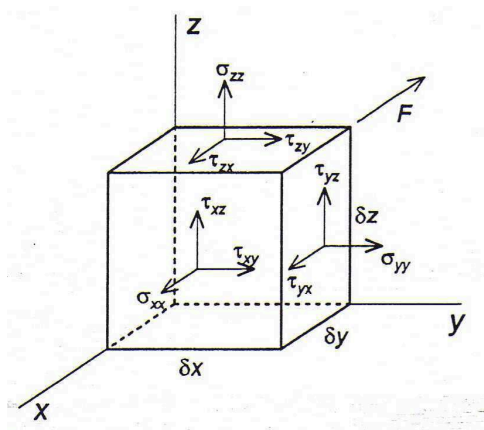
W_o je modul průřezu v ohybu [mm^3].

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

kde M_k je točivý moment [Nmm];
 W_k je modul průřezu v krutu [mm³].

Napětí při deformaci má v každém bodě tělesa jinou velikost i směr. Pokud je napětí ve směru osy, jedná se o napětí normálové. V kolmém směru k ose existuje napětí smykové. Tyto složky napětíového stavu v libovolném bodě zatěžovaného tělesa se pak dají popsat tenzorem napětí. Tenzor napětí druhého řádu (5) je tvořen třemi normálovými složkami (σ_{ii}) a šesti složkami smykového napětí (τ_{ij}), kde $i \neq j$ [3]. Rozklad sil tenzoru napětí ve stěnách krychle je zobrazen na *obr.2*.

$$\sigma \equiv \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$



Obr.2. Jednotlivé složky tenzoru napětí působící na sledovaný element [3].

Pomocí tenzoru se dá vyjádřit např. i výše zmiňovaná deformace (6) [3]:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad [-] \quad (6)$$

kde ε_{ii} je tahová složka tenzoru deformace a např. pro složku $\varepsilon_{xx} = \frac{du}{dx}$;

γ_{ij} je smyková složka tenzoru deformace, kde $i \neq j$ a složka $\gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right)$.

2 Materiály pro energetiku

Při provozu zařízení v energetickém průmyslu dochází postupem času k degradaci předurčených vlastností materiálu, kvůli kterým dochází především ke snížení životnosti celé konstrukce. To znamená, že míra bezpečnosti provozu komponent dlouhodobě pracujících zařízení, se v průběhu provozní životnosti může výrazně měnit od původního návrhu [4]. Díky této skutečnosti, jsou nároky na materiály pro energetiku, které pracují za podstatně složitějších podmínek dosti náročné. Složitějšími podmínkami se myslí především práce za vysokých provozních teplot, vysokých provozních tlaků, dále reakce materiálu na okolní prostředí či vnější mechanické zatížení. Komponenty daného zařízení pracující v takových podmínkách, tak mohou podléhat různým degradačním procesům, které se nazývají souhrnným názvem "stárnutí". Mezi degradační mechanismy patří především teplotní a deformační stárnutí, vodíkové zkřehnutí, radiační zkřehnutí či zkřehnutí vyvolané kapalnými kovy [4]. Značný vliv na chování konstrukcí, mají mimo jiné také samotné vlastnosti použitého materiálu, či např. technologické operace použité na jejich výrobu. Všechny tyto jevy mohou velice nepříznivě ovlivnit provoz zařízení. Může dojít k částečné či úplné nespolehlivosti konstrukce, vlivem iniciace a růstu trhlin, proto je třeba nejen pravidelně kontrolovat aktuální stav komponent provozovaného zařízení [4] a upravovat provozní podmínky, ale je také třeba dbát zvýšené pozornosti už při samotném návrhu materiálu pro danou část konstrukce.

2.1 Základní degradační procesy materiálů pro energetiku

Jedny z největších a nejvýznamnějších degradačních procesů vznikajících při provozu zařízení v energetickém průmyslu, jsou tečení materiálu (creep), vysokoteplotní koroze materiálu a také vysokoteplotní popouštěcí křehkost. Proto je jejím nejzákladnějším vlastnostem níže věnována menší pozornost.

2.1.1 Creep

Pod slovem creep (tečení) se dá představit časově závislá nevratná plastická deformace, která se v materiálu uskutečňuje při zvýšené teplotě a konstantním napětí vlivem dlouhodobého zatěžování [5]. Pokud dojde ke creepu v konstrukčním materiálu, může nastat lom součástky. Čím vyšší je provozní teplota a čím větší je i zatížení, tím rychleji může lom

nastat. Tečení lze ovlivnit teplotou tavení, modulem pružnosti či velikostí zrna [6]. Creepové charakteristiky lze popsat pomocí křivky tečení, což je závislost poměrného prodloužení ε na čase t . Tato křivka (*obr.3.*) se získává na základě výsledků creepových zkoušek pro konkrétní napěťové a teplotní podmínky a lze pomocí ní například určit rychlost stacionárního tečení, které je funkcí daného napětí a teploty (7) [5]:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_s = f(\sigma, T) \quad [\text{s}^{-1}] \quad (7)$$

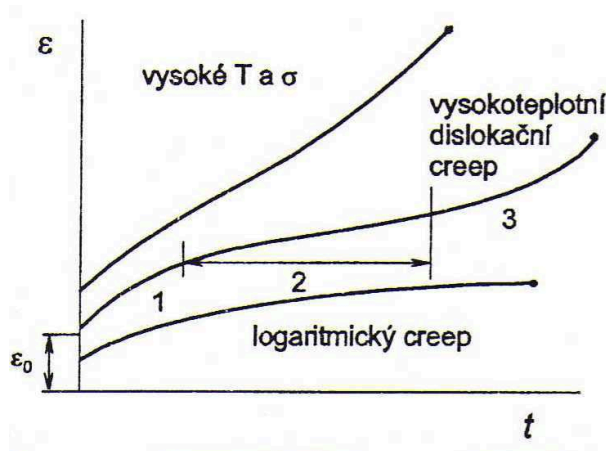
Stacionární tečení se dá vypočítat například pomocí Nortonova vztahu s konstantní T (8), či v případě vysokých působících napětí pomocí exponenciální funkce ve tvaru (9) a to opět s uvážením konstantní teploty [5]:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_s = A \cdot \sigma^q \quad [\text{s}^{-1}] \quad (8)$$

kde A, q jsou materiálové konstanty.

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_s = A \cdot \exp(B \cdot \sigma) \quad [\text{s}^{-1}] \quad (9)$$

kde A, B jsou konstanty.



Obr.3. Typické závislosti creepové deformace na čase, kde 1 je primární creep, 2 je sekundární creep a 3 představuje creep terciální [3].

Pro extrapolaci výsledků ze zkoušek tečení se používají různé metody. Nejznámější a nejpoužívanější je metoda Larson - Millerova, při které se transformuje logaritmická závislost $\log \sigma - \log t$ (stanovená při různých teplotách), na souřadnicový systém $\log \sigma - \text{parametr } P_{LM}$. Parametr P_{LM} se dá vyjádřit pomocí vztahu (10) [3, 7]:

$$P_{LM} = T (\log t + C) \quad [-] \quad (10)$$

kde C je konstanta závislá na napětí i materiálu a zpravidla se rovná hodnotě 20. Tato konstanta byla určena na základě zkušeností, které prokázali, že její ideální hodnota by měla být z intervalu od 17 do 23 [7].

Velice podstatný z energetického hlediska je především creepový lom, který může nastat [6]:

1. při porušení vznikem interkrystalického kavitačního lomu, kdy dochází k nukleaci kavit na hranicích zrn, které se postupně rozrůstají. Nakonec dojde k propojení kavit a ke vzniku mikrotrhlin, které dále rostou a spojují se v makrotrhlinu. Při vzniku makrotrhliny dochází k velkému poškození materiálu a obvykle dojde k finálnímu lomu konstrukce. Tento typ lomu nastává při vysokých teplotách a nízkých rychlostech deformace.
2. další porušení může nastat vlivem interkrystalické trhliny, při kterém dochází ke vzniku trhlin přímo na zrně matrice a dále k růstu těchto trhlin podél hranic zrn. K lomu pak opět dochází po spojení mikrotrhlin v jednu makro trhlinu. Opět vzniká při vysokých teplotách a nízkých rychlostech deformace.
3. pokud dojde ke vzniku transkrystalického creepového lomu, jde o tzv. dutinový lom. Tento typ poškození materiálu se projevuje při velkých rychlostech tečení a při nízkých teplotách. Dochází ke vzniku dutin na vměstcích (precipitátech), k jejich postupné koalescenci a následné ztrátě plastické stability materiálu [8].

2.1.2 Vysokoteplotní koroze

Vysokoteplotní koroze je velice nežádoucí jev, vznikající při dlouhodobé expozici. Při tomto jevu dochází ke značné změně mechanických vlastností oceli. Aby se takovému

porušení žáruvzdorného materiálu předešlo, je třeba kovovou matici dostatečně koncentrovat selektivně oxidujícím prvkem a také zajistit dostatečně vysokou difúzní rychlost prvku v matici, čímž se předejde vytvoření velkého koncentračního gradientu pod rostoucí oxidickou vrstvou [6]. Právě i z tohoto důvodu jsou nejpoužívanější žáruvzdorné materiály tvořené chromem, který při oxidaci na vzduchu vytváří oxidickou vrstvu (Cr_2O_3 a FeCr_2O_4).

2.1.3 Popouštěcí křehkost

K popouštěcí křehkosti dochází především u vyšších teplot a to v doprovodu karbidotvorných prvků, jakými jsou Cr, Mn, Mo, W, Ti, Zr a Nb. Tato křehkost může být vyvolána více mechanismy a to především díky poklesu vrubové houževnatosti při pokojové teplotě či při poklesu creepové tažnosti v určitých popouštěcích teplotních intervalech [6]. Vlivem popouštěcí křehkosti se také o něco snižuje tvrdost materiálu. Aby došlo k omezení tohoto typu křehkosti, musí se snížit obsahy některých doprovodných prvků. Těmito prvky jsou P, Sb, Sn a S a jejich snížení se vyžaduje především při teplotách okolo 475 °C, kdy je popouštěcí křehnutí nejvýraznější [6]. Popouštěcí křehkost se vyvíjí buď izotermicky (během popouštění) nebo anizotermicky (při pomalém ochlazení z vyšších popouštěcích teplot) a dá se popsat převážně těmito dvěma teplotními intervaly [9]:

1. Nízkoteplotní popouštěcí křehkost (nevratná), která vzniká při teplotách od 250 do 400 °C;
2. Vysokoteplotní popouštěcí křehkost (vratná), ke které dochází při 450 až 650 °C.

2.2 Konkrétní materiály pro energetické využití

Materiály, které se používají pro zařízení v energetickém průmyslu, se dají souhrnně nazvat "žárupevné". Žárupevné materiály přišly s vynalezením plynové turbíny, kdy se hledal kompromis mezi ekonomickým hlediskem a mezi pracovními parametry páry i teplenou účinností materiálu. Jedná se tedy o oceli, které vykazují především vysokou dlouhodobou pevnost při tečení. Tato pevnost je důležitá proto, že komponenty vyrobeny z těchto materiálů, pracují často za vysokých teplot nad 600 °C. Dále tyto oceli musí vykazovat vysokou mez kluzu i mez v tahu, tedy vysoké pevnostní parametry, musí být také dostatečně tvárné, tažné, odolné proti křehkému lomu, tepelné i tepelně mechanické únavě. Kromě toho je nezbytná stabilní struktura materiálu i v průběhu zatěžování za vysokých teplot, dále by tyto materiály neměly být náchylné k poklesu či nárůstu zpevnění a měly by odolávat

provozní křehkosti. Nutností je i vysoký součinitel tepelné vodivosti a zároveň nízký součinitel teplotní roztažnosti. Za samozřejmé vlastnosti žárupevných ocelí se považují dobrá žáruvzdornost i žárupevnost, odolnost vůči korozi ve spalínách i vodní páře, vhodnost k tváření nebo například schopnost pracovat při tlacích 25 MPa a výše. Měl by být brán ohled i na ochranu životního prostředí. Nepostradatelná je také samozřejmě zaručená svařitelnost, vysoká spolehlivost, dobrá vyměnitelnost nejvíce namáhaných součástí a v neposlední řadě cena [6]. Jak lze pozorovat, výčet těchto kritérií je velmi obsáhlý a nemusí být zdaleka konečný. Všechny parametry rozhodně nelze při návrhu či výrobě jednoho typu materiálu splnit na maximum, jde často o protichůdná kritéria, proto je navrhování takových materiálů pořád ve vývoji a ve stádiu zdokonalování. Každá z komponent daného zařízení pracuje na jiném principu, jsou na ni kladeny různé požadavky a podle toho je také třeba volit a správně vybrat to nejvhodnější co materiálový průmysl nabízí. Je také třeba značného kompromisu z hlediska splnění důležitých vlastností kladených na daný materiál komponenty energetického zařízení.

2.2.1 Rozdělení žárupevných materiálů

Žárupevné oceli se podle chemického složení a s přihlédnutím na provozní teploty rozděluje na [6]:

- *nelegované (uhlíkové)*, které pracují při maximálních pracovních teplotách 480 °C;
- *nízkolegované*, pracující do teplot 580 °C;
- *vysokolegované (chromové)*, pracující v intervalu pracovních teplot od 580 do 650 °C;
- *austenitické*, pracující při maximální provozní teplotě okolo 750 °C.

2.2.1.1 Nelegované oceli

Touto skupinou jsou mikrolegované oceli například na bázi vanadu či niobu, které jsou vysoce výhodné z hlediska použitelnosti v podcreepové oblasti. Podcreepová oblast je oblast s pracovními teplotami maximálně okolo 400 - 500 °C. Jde tedy o uhlíkové feritické oceli, jejíž žárupevnost je dána precipitačními fázemi V (C, N) a Nb (C, N). Obsah legur bývá u tohoto typu materiálů většinou do 2 hmotnostních procent. Lepších mechanických vlastností nelegovaných ocelí lze dosáhnout tepelnými úpravami (žháním, kalením, popouštěním, cementací či např. nitridací).

2.2.1.2 Nízkolegované oceli

Do kategorie nízkolegovaných ocelí se řadí především oceli CrMo a CrMoV, jejichž největší výhoda spočívá v materiálových i finančních úsporách se zachováním dobrých charakterových vlastností. Pod ocelí CrMo se skrývá materiál 15 313, který se dle české normy značí jako ČSN 41 5313 [10]. Tento materiál je bezesporu nejčastější celosvětově používaná ocel se zvláštními vlastnostmi pro práci za vyšších teplot okolo 540 °C a její chemické složení je uvedeno v *tab.1*. Ekvivalenty k tomuto označení oceli jsou například 10CrMo9-10 dle EN 10028/2-92, P34 dle ISO 2604-75, P22 dle ASTM A335-75.

Pro energetický průmysl má však větší uplatnění ocel 15 128, dle ČSN 41 5128 [11] s ekvivalenty: ocel 11CrMo9-10 dle normy EN 43, ocel P33 dle ISO 2604-75 či P24 dle ASTM A405-76. Tento druh oceli je tvořen základními prvky Fe a C, dále pak Cr, Mo a V a doprovodnými prvky Mn, Si, S, P, Al atd. Procentuální chemické složení při tavně materiálu dle ČSN 41 5128 je uvedeno v *tab.1*. ČSN 41 5128 také uvádí, že jde o žárupevnou CrMoV ocel určenou pro práci za vyšších teplot a to do cca 580 °C.

Tab.1. Chemické složení ocelí 15 313 a 15 128.

hm. %	15 313	15 128
C	0,08 až 0,15	0,10 až 0,18
Mn	0,40 až 0,80	0,45 až 0,70
Si	0,15 až 0,40	0,15 až 0,40
Cr	2,00 až 2,50	0,50 až 0,75
Mo	0,90 až 1,00	0,40 až 0,60
V	-	0,22 až 0,35
Al	-	max. 0,025
P	max. 0,035	max. 0,040
S	max. 0,035	max. 0,040

Další nízkolegovanou ocelí v energetickém průmyslu je např. ocel 15 229 [12], která je také CrMoV. Její velká výhoda oproti oceli 15 128 je v úspoře materiálu a celkové hmotnosti navrhované komponenty, vzhledem k možnosti použití až dvakrát tenčí tloušťky stěny. Její nevýhoda je ale především ve složitější technologické zpracovatelnosti.

2.2.1.3 Vysokolegované oceli

Vysokolegované oceli jsou jednoznačně nejvýznamnější z hlediska žárupevných ocelí a to konkrétně oceli s 9 až 12 % Cr. Mají vyšší žárupevnost vůči nízkolegovaným a to až do teplot okolo 650 °C, dále se vyznačují dobrou korozní odolností vůči vodní páře i plynnému prostředí. Do této skupiny patří například ocel P91 (X10CrMoVNb9-1) [13] či ocel značená jako Eurofer 97 [14], která se využívá pro jadernou energetiku. Chemické složení těchto materiálů je uvedeno v tab.2. Eurofer 97 je martenzitická ocel, ve které jsou legury jako Cr, Mo, V a Nb nahrazeny W, případně Ge. Tato ocel je také mikrolegovaná Ag, Tb, Ho, Eu apod. a má vysokou čistotu.

Tab.2. Chemické složení oceli P91 a oceli Eurofer 97.

hm. %	P91	Eurofer 97
C	0,08 až 0,12	0,09 až 0,12
Mn	0,30 až 0,60	0,20 až 0,60
Si	0,20 až 0,50	max. 0,050
P	max. 0,020	max. 0,005
S	max. 0,010	max. 0,005
Ni	max. 0,400	max. 0,010
Cr	8,00 až 9,50	8,50 až 9,50
Mo	0,85 až 1,05	max. 0,005
V	0,18 až 0,25	0,15 až 0,25
Al	max. 0,040	max. 0,010
N	0,03 až 0,07	0,015 až 0,045
Nb	0,06 až 0,10	max. 0,005
Cu	max. 0,030	max. 0,010
Ta	-	0,10 až 0,14
W	-	1,00 až 1,20
Ti	-	max. 0,020
B	-	max. 0,002
Co	-	max. 0,010
O	-	max. 0,010
As+Sn+Sb+Zr	-	max. 0,050

2.2.1.4 Austenitické oceli

Austenitické oceli se vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi a také výbornou korozní odolností a to při vysokých teplotách okolo 650 až 700 °C. Mají ale také značné nevýhody a to především nízkou tepelnou vodivost, velkou teplotní roztažnost či cenu. Dle chemického složení se dělí do dvou základních skupin a to na austenitické oceli Cr-Ni a austenitické oceli na bázi Mn-Cr. Do skupiny austenitických ocelí se řadí například ocel 17 341 s chemickým složením uvedeným v *tab.3.* [15]. Ekvivalenty pro tento materiál jsou např. dle EN 10269 ocel X6CrNiMoB17-12-2 a dle ASTM A 240 ocel 316H. Tento materiál je však dobře nahraditelný vysokolegovanou P91, což je výhodné hlavně z cenového hlediska a při teplotách do cca 590 °C i z hlediska úspory materiálu při použití menší tloušťky stěny komponenty.

Tab.3. Chemické složení oceli 17 341.

hm. %	17 341
C	0,04 až 0,10
Mn	max. 2,000
Si	max. 0,800
P	max. 0,045
S	max. 0,030
Ni	11,5 až 14,0
Cr	16,0 až 18,0
Mo	2,0 až 2,8

2.2.2 Tepelné zpracování žárupevných ocelí

Prvním krokem tepelného zpracování žárupevných ocelí je ohřev materiálu na kalící teplotu, neboli teplotu austenitizace (950 až 980 °C), při které dochází k rozpadu karbidické fáze a k homogenizaci austenitu. Při rozpouštění karbidických fází záleží především na rychlosti difúze uhlíku a legur v matici. Rychlost difúze uhlíku v austenitu je asi o 3 až 4 řády vyšší, než rychlost difúze legujících prvků [6]. Prodlevy austenitizace nesmí být příliš dlouhé, ale ani krátké. U dlouhých prodlev dochází k hrubnutí zrna, což výrazně snižuje odolnost materiálu vůči tečení. U krátkých časových prodlev na austenitizační teplotě dochází v oceli ke vzniku austenitu s malým obsahem legujících prvků, jejichž důsledkem je vznik velmi příznivých podmínek pro heterogenní nukleaci karbidických fází již ve stádiu

ochlazování austenitu [6]. Ohřevem na kalící teplotu a prudkým ochlazením oceli v oleji, vodní mlze či proudem na vzduchu, lze získat lepší mechanické a fyzikální vlastnosti a to především vysokou tvrdost materiálu. Dochází však k významné ztrátě houževnatosti oceli.

Po ohřevu a procesu kalení následuje fáze popouštění. K popouštění dochází při teplotách vyšších, než jsou provozní teploty, které se vyznačují precipitací speciálních karbidů. Tyto teploty závisí na druhu materiálu, např. u nízkolegovaných Cr-Mo ocelí se jedná o teploty obvykle v rozmezí od 500 do 625 °C a u nízkolegovaných Cr-Mo-V ocelí je tento interval cca od 600 do 680 °C [6]. Popouštěním lze získat především lepší mechanické vlastnosti, může dojít např. ke zvýšení meze kluzu, kterého lze dosáhnout vyšší rychlosti ochlazení z austenitu [6]. Kromě mechanických vlastností lze popouštěním zvýšit také žárupevné vlastnosti materiálu a především dochází ke snížení pnutí v materiálu.

2.2.3 Svarový spoj žárupevných ocelí

Vzhledem k tomu, že je svar u energetických zařízení téměř pravidlem a to jak u nově vyrobených konstrukcí, tak i u konstrukcí, které jsou za své provozní životnosti opravovány, je velice důležité, aby dané oceli měli relativně dobrou svařitelnost. Při svařování žárupevných ocelí je třeba dodržet určité podmínky, mezi které patří především zabránění vzniku trhlin a jejich šíření ve svaru a také zajištění určitých mechanických a žárupevných vlastností svarového spoje. Je také zapotřebí brát v úvahu, že struktura svařovaného kovu je hodně závislá na difúzních procesech probíhajících při svařování a na následném tepelném zpracování [6].

Při svařování dochází ke spojování dvou materiálů, je tedy důležité zamyslet se také nad vlastnostmi přídavného materiálu, který by měl především dosahovat vysoké creepové pevnosti a také určité úrovně nárazové práce. Svarové spoje se rozdělují na homogenní a heterogenní. Homogenní svarový spoj je takový, u kterého je chemické složení základního svařovaného materiálu podobné chemickému složení materiálu přídavného. Heterogenní svarový spoj má chemické složení základního materiálu a přídavného kovu rozdílné a je typický právě pro žárupevné materiály. Vzhledem k rozdílnému chemickému složení základního a přídavného materiálu, a tak i různým mechanickým vlastnostem, je třeba dbát na svařované oblasti konstrukčních materiálů zvýšenou pozornost a pravidelně tyto oblasti kontrolovat z hlediska jejich možných degradačních procesů [6].

3 Způsoby mechanického zkoušení konstrukčních materiálů

Většina konstrukčních materiálů je navrhována a zkoumána na základě výsledků mechanických zkoušek [16]. Cílem tohoto zkoušení je především simulace dějů, které vznikají při reálném provozu energetického zařízení a stanovení mezních stavů konstrukcí, díky kterým se může zamezit či zpomalit degradace těchto zařízení. Výsledky mechanických zkoušek také mohou posloužit k určení vhodnosti materiálu k danému použití, k zdokonalení návrhu technologických postupů výroby či k designu nových konstrukčních materiálů. Mechanické zkoušky se provádí za normálních, snížených či zvýšených teplot a to na normovaných zkušebních tělesech, které reprezentují reálné podmínky provozované konstrukce. Základní dělení mechanických zkoušek je z hlediska působení síly na zkušební těleso [1]:

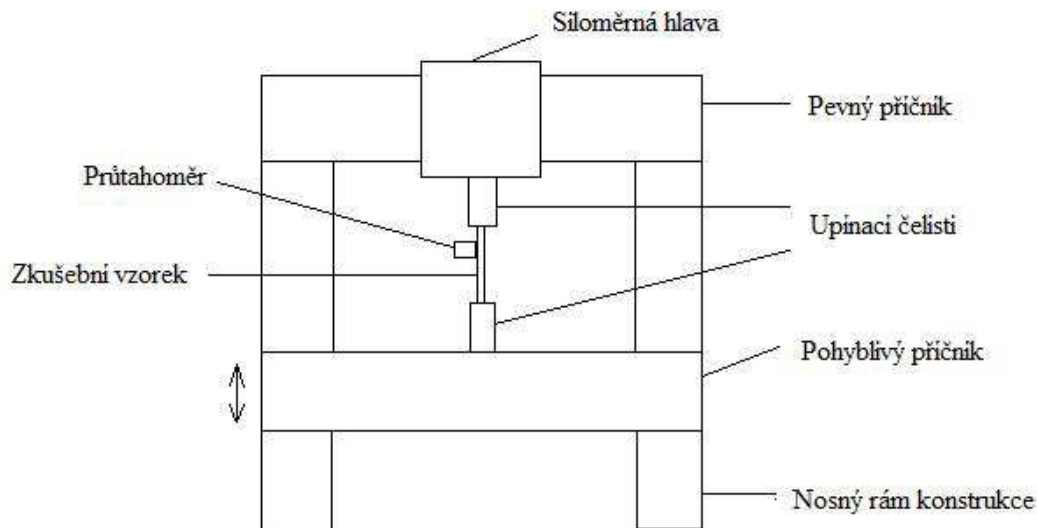
- *zkoušky statické*: u těchto zkoušek dochází k pozvolnému zatěžování zkušebního tělesa po dobu několika minut, hodin či dnů a to v závislosti na typu zkoušky.

- *zkoušky dynamické*: mezi dynamické zkoušky patří zkoušky rázové a zkoušky cyklické. U rázového zkoušení dochází k nárazovému silovému působení na vzorek a to po dobu maximálně několika sekund. Zkoušky cyklické jsou založeny na opakujícím se cyklickém namáhání, kdy se měří určitý počet cyklů za jednotku času. Zkoušky cyklického namáhání jsou určené především pro zjištění únavy materiálu.

- *zkoušky tvrdosti*: vyznačují se statickým či dynamickým vnikáním cizího tělíska do zkoušeného materiálu.

3.1 Zkoušky statické

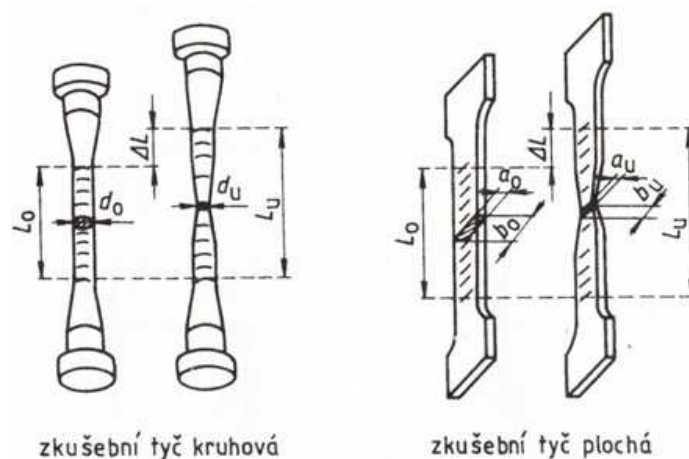
Mezi zkoušky statické patří především zkouška pevnosti v tahu [17] (na kterou bude v této práci užší zaměření), dále pak zkouška v tlaku, ohybu, krutu a stříhu. Tyto zkoušky lze provádět na univerzálním zkušebním stroji, jehož schéma je zobrazeno na *obr.4*. Zkušební zařízení se skládá z nosného rámu konstrukce, siloměrné hlavy, pevného a pohyblivého příčnicku. Na příčnicích jsou upnuty čelisti pro uchycení vzorku a na vzorek bývá přidělán průtahoměr pro zaznamenání změny délky vzorku při zatěžování. Zkušební stroje pro statické zkoušení materiálu bývají hydraulické, mechanické, elektronické či počítačově řízené.



Obr.4. Schéma univerzálního zkušebního stroje.

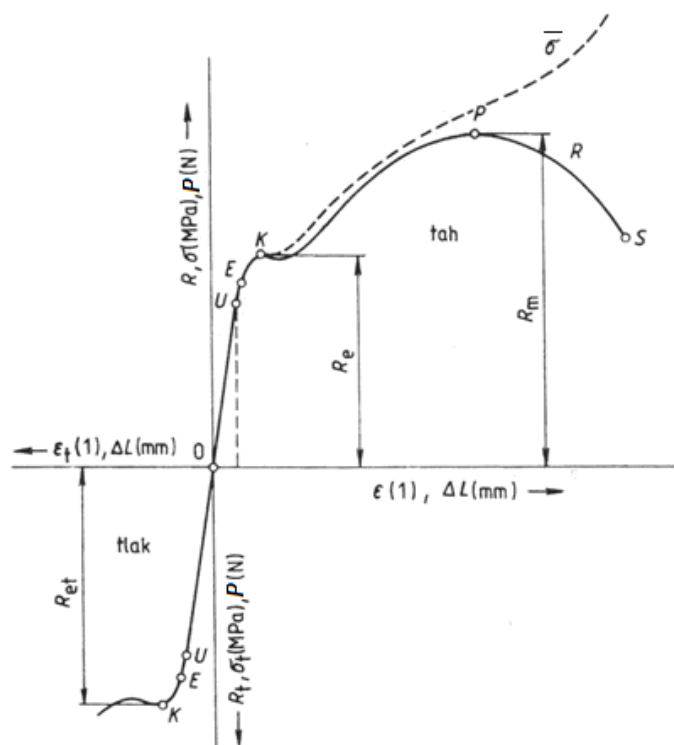
3.1.1 Zkouška tahem

Jedná se o normovanou zkoušku [17], která patří k nejrozšířenějším statickým, pevnostním zkouškám. Tento typ zkoušky se provádí na zkušebním trhačím zařízení (*obr.4.*), do kterého se upínají normalizované zkušební vzorky, které mohou být kruhové či ploché (*obr.5.*) a jsou vyráběny ze stejného materiálu jako je zkoumaná konstrukce či daná zkušební součást. Kromě rozdílu v průřezu jsou i různé délky zkušebních tyčinek. Pro krátkou kruhovou tyč se uvádí $L_0 = 5.d_0$, pro dlouhou kruhovou tyč je $L_0 = 10.d_0$ a u tyče ploché s obdélníkovým průřezem se počítá krátká tyč z $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ a tyč dlouhá má hodnotu $L_0 = 11,3\sqrt{S_0}$ [3].



Obr.5. Tvary zkušebních tyčí pro zkoušku tahem [1].

V průběhu zkoušky dochází ke snímání napětí a deformace (či zatěžující síly a poměrného prodloužení zkušební tyče) a výsledkem je záznam smluvního diagramu $\sigma - \varepsilon$ ($P - \Delta L$) (obr.6.). Získané hodnoty smluvního diagramu slouží k výpočtům potřebných mechanických charakteristik - vzorce (11) až (18) [1].



Obr.6. Průběh tahového diagramu měkké uhlíkové oceli, včetně záznamu tlakového zatížení materiálu [1].

Smluvní diagram měkké uhlíkové oceli, lze popsat několika vyznačenými body (obr.6.) [1]:

U - mez úměrnosti: do tohoto bodu je závislost přímková (lineární) a prodloužení je v tomto bodě přímo úměrné napětí, což odpovídá Hookovu zákonu.

E - mez elasticity (pružnosti): charakterizuje pružnou deformaci, kdy po odlehčení vzorku ještě nedochází k jeho makroskopickému porušení. I zde se stále uvažuje Hookův zákon (11):

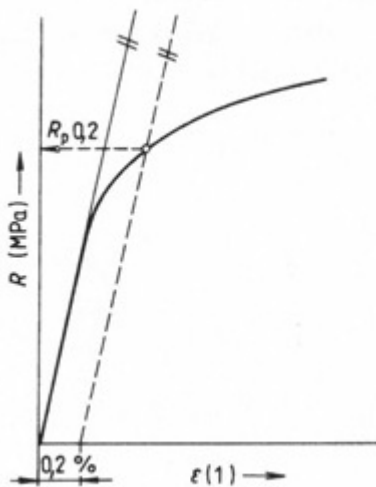
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (11)$$

kde E je modul pružnosti v tahu (Youngův modul), který se udává obvykle v GPa a nabývá různých hodnot podle typu materiálu (např. pro ocel je $E = 210 \text{ GPa}$).

K (σ_y , R_e či $R_{p0,2}$) - *mez kluzu*: je nejmenší napětí, u kterého již dochází k prvním makroskopickým plastickým deformacím v materiálu. Je to přechod mezi elastickou a elasticko-plastickou oblastí a může být buď výrazná R_e (σ_y) či nevýrazná $R_{p0,2}$. Výrazná mez kluzu se počítá z poměru síly na mezi kluzu P_e a průřezu tyče S_0 (12). Výrazná mez kluzu je také charakterizována výrazným prodlováním tyče, bez většího nárůstu zatěžující síly. Typickým materiálovým představitelem s výraznou mezí kluzu je ocel s nízkým obsahem uhlíku.

$$R_e = \frac{P_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (12)$$

Nevýrazná $R_{p0,2}$ se projevuje tak, že v materiálu nenastane prodleva a pak nelze mez kluzu z tahového diagramu zjistit. V takových případech se proto bere ta hodnota napětí, která způsobí trvalou deformaci při 0,2 % z počáteční měřené délky [1, 3]. Takové napětí se nejčastěji zjišťuje graficky - vedením rovnoběžky ke křivce pracovního diagramu (*obr.7.*).



Obr.7. Grafické stanovení $R_{p0,2}$ z pracovního diagramu [1].

P (R_m) - *mez pevnosti*: je maximální hodnota dosažené pevnosti v materiálu, neboli maximální závislost smluvního napětí na smluvní deformaci. Bod P také značí bod nestability, při kterém lze pozorovat první pokles zatížení, tzn., že dochází k tzv. dynamickému odpevňování materiálu. Smluvní hodnota meze pevnosti je daná podílem největší zatěžující síly P_m k původnímu průřezu tyče S_0 (13) [1, 16].

$$R_m = \frac{P_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (13)$$

S - přetržení: v tomto bodě dochází k úplnému přetržení vzorku a k ukončení zkoušky.

Ze zkoušky v tahu se dají také určit [1, 16]:

Poměrné prodloužení ε : výpočtem z poměru rozdílu konečné a počáteční délky ΔL k původní délce tyče L_0 (14):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad [-] \quad (14)$$

kde L_u je konečná naměřená délka zkušebního vzorku [mm].

Tažnost A: což je poměrná podélná trvalá deformace udávána v procentech (15):

$$A = \varepsilon \cdot 100 \quad [\%] \quad (15)$$

Ještě stojí za zmínku, že např. pro kruhovou dlouhou tyč se tažnost A značí jako A_{10} a obdobně pak kruhová krátká tyč je značená jako A_5 . Dále lze uvést také to, že tažnost měřená na tyčích dlouhý je menší než ta měřená na krátkých ($A_{10} < A_5$) [3].

Kontrakce Z: která se určuje z poměru zúžení průřezu tyče po přetržení S_u a původního průřezu tyče S_0 a tejně jako tažnost je udávána v procentech (16):

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (16)$$

Pro přepočet skutečných hodnot mechanických vlastností získaných jednoosou tahovou zkouškou se používají vztahy skutečného napětí (17) a logaritmického skutečného prodloužení (18) [3]. Skutečné hodnoty napětí a deformace ve svých výpočtech zahrnují, oproti smluvním hodnotám tahového diagramu, také vzniklé změny průřezu vzorku v průběhu tahové zkoušky.

$$\bar{\sigma} = \frac{P.L_u}{S_0 L_0} = \frac{P}{S_0} \frac{L_u + \Delta L}{L_0} = \frac{P}{S_0} \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right) = \frac{P}{S_0} (1 + \varepsilon) = \sigma (1 + \varepsilon) \quad [\text{MPa}] \quad (17)$$

$$\bar{\varepsilon} = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L_u} = \ln \frac{L_u}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad [-] \quad (18)$$

Nelineární část v napěťově deformační charakteristice, která odpovídá nevratným plastickým deformacím lze u kovů popsat Ramberg - Osgoodovým zákonem zpevnění (19) [5]:

$$\bar{\sigma} = K \cdot \varepsilon_p^n \quad [\text{MPa}] \quad (19)$$

kde $\bar{\sigma}$ je skutečné napětí [MPa];

K je pevnostní koeficient a jeho hodnoty lze určit z regresní analýzy [MPa];

ε_p je skutečná plastická deformace [-];

n je exponent deformačního zpevnění, určený z regresní analýzy [-]. V případě ideálně elastického tělesa je roven 1 a v případě ideálně plastického materiálu se rovná 0.

Z tahového diagramu se dá také určit vrubová houževnatost, která dobře koresponduje s hustotou deformační energie. Hustota deformační energie je veličina zahrnující pevnost i tažnost a dá se vypočítat z plochy pod tahovým diagramem. Vratná elastická deformační energie je dána vztahem (20) [3]:

$$w_e = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon' = \int_0^{\varepsilon} E \varepsilon' d\varepsilon' = \frac{E \varepsilon^2}{2} \quad [\text{J.m}^{-3}] \quad (20)$$

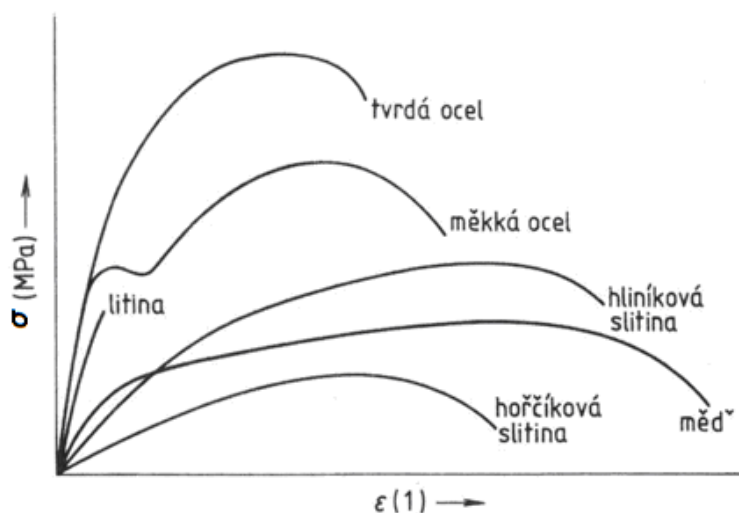
Plastická hustota deformační energie, zahrnující trvalé deformace, se určí ze vztahu pro celkovou hustotu deformační energie (21) [4]:

$$w = w_e + w_p = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon') d\varepsilon' - \frac{\sigma_f^2}{2E} \rightarrow w_p = w - w_e = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - \frac{\sigma_f^2}{2E} \quad [\text{MPa}] \quad (21)$$

kde ε_f je skutečná deformace do lomu [-];

σ_f je skutečné napětí do lomu [MPa].

Křivka pevnosti v tahu závisí na více vlastnostech a okolnostech. Výrazné rozdíly lze sledovat především při srovnání výsledků tahových zkoušek různých použitých materiálů (obr.8.):



Obr.8. Příklady smluvních diagramů různých kovů a slitin [1].

3.2 Zkoušky dynamické

Mechanické zkoušky dynamické se používají především při zjišťování náhlého nestabilního lomu materiálu. Tyto zkoušky jsou velice podstatné, protože většina strojních i energetických zařízení je v reálném provozu zatěžována měnícími se podmínkami [16].

3.2.1 Zkouška rázem v ohybu

Je to nejpodstatnější a nejpoužívanější dynamická zkouška, pomocí které se zjišťuje, kolik energie bylo spotřebováno na porušení zkušební tělesa [16]. Výsledkem této zkoušky je zjištění houževnatosti či křehkosti zkoušeného materiálu. Dá se také zjistit tranzitní chování materiálů a to s využitím podchlazených vzorků. Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho je stejně jako zkouška tahová normovaná [18]. Dle této normy je zkušební těleso odebírníkového průřezu o rozměrech 10 x 10 x 55 mm s V vrubem hloubky 2 mm nebo s vrubem tvaru U, jehož předepsaná hloubka je 5 mm. Výjimkou nejsou ani malá zkušební tělesa o rozměrech 3 x 4 x 27 mm s hloubkou vrubu 1 mm [3]. K provedení vrubové zkoušky slouží Charpyho kyvadlové kladivo. Kladivo se volně pohybuje po své kruhové dráze z výšky h_1 a naráží na vrub zkušební tělesa, které přeráží. Při pohybu po kruhové dráze se energie kladiva mění

z původní potenciální $E_{p1} = G \cdot h_1$ na energii kinetickou (22), která svého maxima dosahuje při nárazu na zkušební vzorek. Při přeražení vzorku se část kinetické energie spotřebuje na degradaci vzorku a zbytková energie slouží k vychýlení kladiva do jeho konečné výšky h_2 . Vychýlením kladiva se dosáhne opět energie potenciální $E_{p2} = G \cdot h_2$ a nárazová práce spotřebovaná na přetržení vzorku $K(U,V)$ se pak vypočítá podle rovnice (23). Z nárazové práce se dá určit vrubová houževnatost $KC(U,V)$ (24), jež je dána právě podílem nárazové práce $K(U,V)$ a počátečního průřezu v místě vrubu S_0 [1, 16].

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \frac{G}{g} \cdot v^2 \quad [\text{J}] \quad (22)$$

kde v je rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];

G je tíha kladiva [N];

g je tíhové zrychlení rovné hodnotě $9,81 \text{ [s}^{-2}\text{]}$.

$$K(U,V) = E_{p1} - E_{p2} = G \cdot (h_1 - h_2) \quad [\text{J}] \quad (23)$$

kde h_1 je výchozí výška kladiva [m];

h_2 je konečná výška kladiva [m].

$$KC(U,V) = \frac{K(U,V)}{S_0} \quad [\text{J/m}^2] \quad (24)$$

3.3 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost je mechanická vlastnost materiálů, která je zjednodušeně definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Lepší definice je taková, že tvrdost H (25) odpovídá průměrnému tlaku pod indentorem p_m (35) a určuje se z podílu síly P a skutečné plochy trvalého vtisku A_{tr} [3]. Tato definice vychází z toho, že při silovém styku mezi zkušebním tělesem a indentorem dochází ke zvětšování plastické deformace pod stykovou plochou, která se stává po odlehčení trvalou - vzhledem k výraznému zpevnění povrchových vrstev materiálu. Na povrchu vzorku tak lze pozorovat trvalý vtisk [3].

$$H = p_m = \frac{P}{A_{tr}} \quad [-] \quad (25)$$

Zkoušky tvrdosti jsou poměrně rychlou zkušební metodou, přesto nejsou vždy úplně vhodné a přesné. Výsledky těchto měření mohou ovlivnit faktory, jakými jsou nevhodně zvolená metoda měření (např. nevhodně zvolené indentační tělísko), nekvalitní příprava vzorků či např. méně příznivé zkušební podmínky. Kromě samotné tvrdosti lze měřením určit také například pevnost v tahu, obrobiteľnost apod. [16]. Největší výhodou metod měření tvrdosti je především to, že se testy dají provádět jak na zkušebních vzorcích, tak v některých případech přímo na provozované konstrukci.

Zkoušky tvrdosti lze rozdělit do několika základních skupin [16]:

- *zkoušky vrypové*: jedná se o jedny z nejjednodušších zkoušek, ale velkou nevýhodou je jejich omezené využití. Používají se především v mineralogii, kde se tvrdost zkoušených minerálů určuje podle stupnice tvrdosti, kterou tvoří standardní minerály (mastek, kamenná sůl, vápenec, křemec, apatit, živec, křemen, topaz, korund a diamant). Jedná se o vrypovou zkoušku podle Mohse a výsledný minerál odpovídá tomu minerálu stupnice tvrdosti, který nevytvořil při styku se zkoušeným vzorkem na jeho povrchu vryp. Dále zde patří např. zkouška podle Martense, která má využití u tvrdých a křehkých materiálů (např. porcelán či sklo). Princip zkoušky spočívá v pohybu kuželovitého diamantového hrotu určitou rychlostí, po leštění povrchu vzorku. Výsledná tvrdost se určuje ze síly potřebné na vytvoření vrypu ve zkoušeném materiálu.

- *zkoušky odrazové*: tento typ zkoušení se provádí spuštěním tvrdého tělíska z určité výšky na zkušební vzorek a tvrdost materiálu se určuje z velikosti odskoku tělesa od vzorku. Do této kategorie patří například Shoreaho zkouška tvrdosti *HSh*. Zkoušení pomocí odrazu je vhodné především pro tvrdé materiály, u kterých není potřeba příliš velké přesnosti výsledků.

- *vnikací zkoušky*: vnikací zkoušky jsou skupinou nejpoužívanějších zkoušek tvrdosti materiálů vůbec. Dochází při nich k zatlačování tělíska (kulička, jehlan, kužel - dle daného typu zkoušky a zkoušeného materiálu) do zkušební vzorku. Měřítkem tvrdosti je velikost vtisku ve vzorku (měří se vzniklé úhlopříčky, hloubka vtisku či průměr vzniklý na ploše zkušební materiálu).

Měření tvrdosti lze rozdělit také podle způsobu zatěžování, a to na zkoušky [1, 16]:

- *statické*: kdy je indenter zatlačován určitou silou v kolmém směru na povrch vzorku a patří zde především zkoušky tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse.

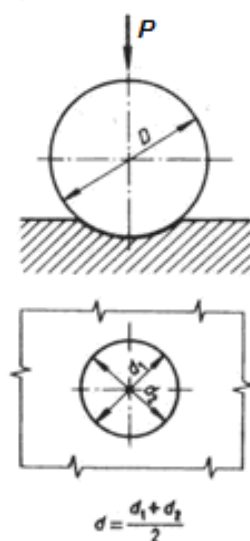
- *dynamické*: zde dochází k průniku indentoru rychlým, rázovitým zatížením. Mezi dynamické metody měření tvrdosti patří např. Poldi kladívko, Shoreho skleroskop či odrazové zkoušky.

3.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Tato zkouška (obr.9.) je využívána především pro měkké oceli, šedé litiny či neželezné kovy (Cu, Sn, Pb, Al) a jejich slitiny [16]. Tvrdost je zjišťována zatlačováním kalené ocelové kuličky (do tvrdosti $HB = 400$) do plochy zkušebního vzorku, která může mít průměry $D = 10; 5; 2,5; 2$ a 1 mm [19, 20]. Zatlačování je prováděno rovnoměrnou silou P , která je v případě ocelí rovná hodnotě $29\,430\text{ N}$ [20]. Síla P se dá také vypočítat podle vzorce (26) [16]:

$$P = K \cdot D^2 \quad [\text{kg}] \quad (26)$$

kde K je koeficient, který je pro oceli roven hodnotě 30, pro neželezné kovy a slitiny roven 10 a pro měkké kovy nabývá hodnotu 2,5.



Obr.9. Zkouška tvrdosti podle Brinella [1].

Doba zatěžování ocelové kuličky t závisí na zkušebním vzorku. U ocelí a litin se zatěžuje po dobu 10 až 15 s, u neželezných kovů je pak rozmezí v závislosti na materiálu od 10 po 180 s. Překročí-li tvrdost HB hodnotu 400, pak je ocelová kulička nevhodná a musí se použít kulička ze slinutých karbidů.

Zařízení pro vykonání této zkoušky se jmenuje Brinellův tvrdoměr a tvrdost se určuje z velikostí průměrů vtisků. Výsledná tvrdost HB se vzhledem ke znalosti průměru vtisku a použité zatěžující síly, dá lehce dohledat v tabulkách. Výsledky zkoušky Brinellovy tvrdosti jsou závislé především na přesnosti přeměření vzniklého vtisku a také na povrchu měřeného vzorku [16]. Vzorek musí být dostatečně rovný, hladký a bez nečistot. Jeho tloušťka musí být větší než osminásobek hloubky vtisku a také musí být dodržena dostatečná vzdálenost vtisku od okraje vzorku. V případě ocelí a litin je dle [20], tato vzdálenost minimálně $2,5d$ a pro neželezné kovy je předepsaná vzdálenost $3d$. Přesto že jsou hodnoty HB lehce dohledatelné v tabulkách, výslednou tvrdost je také možné určit pomocí vztahu (27) [21]:

$$HB = 0,102 \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad [-] \quad (27)$$

kde P je zatížení při zkoušce [N];

D je průměr kuličky [mm];

d je aritmetický průměr dvou proměření vtisku [mm].

Označení Brinellovy zkoušky nemusí být vždy jen číselná hodnota HB . Pokud se zkouší za jiných, než normalizovaných podmínek, je zápis výsledku zkoušky ve tvaru: hodnota naměřené tvrdosti HB $D/P/t$, kde D je udáván v [mm], P v [kp] a t - doba působení zkušebního zatížení v [s].

Kromě samotné tvrdosti HB se dá také ze zkoušky zjistit např. pevnost v tahu R_m a to s využitím vztahu (28):

$$R_m = k.HB \quad [\text{MPa}] \quad (28)$$

kde k je koeficient závislý na materiálu a u ocelí se pohybuje v hodnotách od 3,1 do 4,1.

Pro velice rychlou (avšak méně přesnou) potřebu zjištění tvrdosti s využitím kuličkového indentoru, se dá využít velice jednoduchého ručního přenosného zařízení -

POLDI tvrdoměru. Toto zařízení se dá využít především v provozních podmínkách a to např. při zjišťování tvrdostí svarů [3]. V Poldi kladívku se schovává porovnávací tyčinka, která je ze známého materiálu a má danou pevnost, jejichž znalost se využívá k porovnání se zkoušeným materiálem. Zkouška probíhá tak, že se tvrdoměr přiloží na zkoušený předmět a kladívkem se udeří na úderník. Tím dojde k zatlačení ocelové kuličky do materiálu a k vytvoření vtisku ve vzorku. Zároveň vznikne také vtisk v porovnávací tyčince a výsledkem jsou naměřené průměry obou vtisků. Tvrdost je pak zjištěná stejně jako v případě Brinellových zkoušek, a to z přiložených tabulovaných hodnot [1].

3.3.2 Zkouška tvrdosti podle Meyera

Meyerovu tvrdost (29) lze nazvat jako "dokonalejší Brinellovu metodu". Meyer [21] lépe vyhodnotil fyzikální podstatu měření tvrdosti a to tak, že nebral v úvahu pouze plochu kulové úseče, ale velikost zatížení vztáhl na jednotku plochy průměru vtisku.

$$HM = p_m = \frac{4P}{\pi d^2} \quad [-] \quad (29)$$

kde p_m je střední kontaktní tlak [Pa];

d je kontaktní průměr při plném zatížení vzorku (který by měl být stejný jako otisk vzniklý ve vzorku, po odtížení indentoru) [mm].

3.3.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Tvrdost podle Rockwella je zjišťovaná na Rockwellově tvrdoměru, jehož indentor je z diamantového kužele (*HRA*) s vrcholovým úhlem 120° při zatěžující síle 600 N, z kalené ocelové kuličky o průměru 1,6 mm (*HRB*) se zatěžující silou 1000 N či z diamantového kužele (*HRC*) při zatížení 1500 N [22]. Výsledná hodnota tvrdosti je dána z rozdílu hloubky vtisku předběžného a celkového zatížení, které se pohybuje v hodnotách 150, 100 a 60 kg [3, 22]. Toto zkoušení je velice jednoduché, vzhledem k odečtu tvrdosti materiálu přímo ze stupnice, která je součástí Rockwellova tvrdoměru. Mezi výhody tohoto měření se řadí také nízké nároky na dokonale upravený povrch vzorku, nejedná se však o metodu nejpřesnější a to i vzhledem k určité citlivosti měření, která se negativně projevuje na výsledných hodnotách.

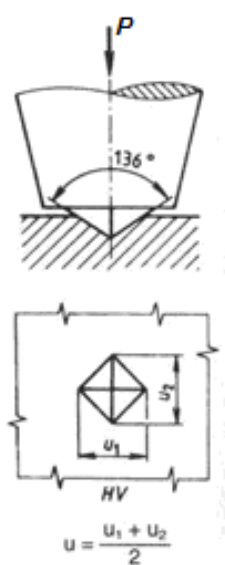
3.3.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Tato zkouška se provádí na Vickersově tvrdoměru, kdy dochází k zatlačování čtyřbokého diamantového jehlanu se čtvercovou základnou a s vrcholovým úhlem 136° do zkušebního materiálu (*obr.10.*). Pomocí mikroskopu je zjišťována střední délka dvou úhlopříček [16, 23] a s využitím tabulovaných hodnot, je dohledána příslušná Vickersova tvrdost HV . Tvrdost dle Vickerse se dá také vypočítat podle vzorce (30) [16, 23]:

$$HV = 0,189 \frac{P}{u^2} \quad [-] \quad (30)$$

kde u je průměrná hodnota úhlopříček [mm].

Zatěžující síly jsou dle normy [23] 9,8; 29,4; 49; 98; 294 a 490 N. Při indentaci nemusí docházet k pravidelnému tvaru vtisku, může nastat tzv. plastický val (obvykle u zpevněných kovů) či naopak propad okrajů vtisku (kovy nezpevněné) [3]. To může mít značný vliv na nepřesnost při odečítání rozměrů úhlopříček. Zápis výsledné tvrdosti má tvar: *číselná hodnota zjištěné tvrdosti HV P/t*, kde P je udána v [kp] a t v [s]. Výhodou je jednoznačně velká přesnost této metody a oproti např. zkoušky Brinellovy i minimální porušení plochy vzorku. Nevýhodou je především omezené materiálové použití a to vzhledem k ostrosti Vickersova indentoru.

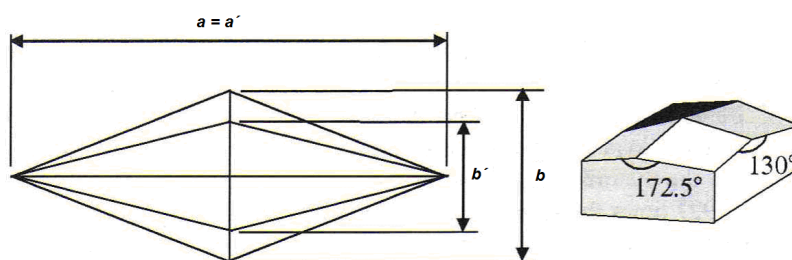


Obr.10. Zkouška tvrdosti podle Vickerse - HV [1].

Kromě tvrdosti se dá zjišťovat také mikrotvrdomost [24] či nanotvrdomost [21]. Měření mikrotvrdomosti se používá např. pro velmi tenké materiály či malé vzorky. K měření se využívají mikrotvrdoměry nejčastěji s diamantovým jehlanem - Vickers (případně Knoop či Berkovich). Zkoušky jsou prováděny s malým zatížením od cca 0,005 do 2 N. Mikrotvrdoměry bývají často součástí metalografického mikroskopu a největší výhodou těchto zkoušek, je např. přímé zjištění jednotlivých fází či zrn ve zkoušeném materiálu. Výsledná hodnota mikrotvrdomosti s použitím Vickersova indentoru se dá přepočítat pomocí stejného vzorce (30) jako v případě výpočtu Vickersovy tvrdosti. Nanotvrdomost je specifická velmi nízkými hodnotami zatížení, které se pohybují až okolo 0,01 g. Nejčastěji používaným indentorem této metody je Berkovichův diamantový trojboký jehlan [21], který je vhodný především pro měření nanotvrdomosti velmi tenkých vrstev materiálu.

3.3.5 Zkouška tvrdosti podle Knoop

Zkušební těleso je podobné Vickersovu indentoru, rozdíl je ale v kosočtvercové základně diamantového jehlanu (*obr.11.*) a v proměřování pouze delší z úhlopříček pro určení výsledné tvrdosti materiálu [25]. Výhoda je především v zanedbatelnosti odpružení materiálu ve směru dlouhé úhlopříčky. Tato metoda je využívána především pro úzké vzorky, které by se jinými metodami naměřit nedaly (např. dráty). Výpočet výsledné tvrdosti je možný podle vztahu (31) [21].



Obr.11. Geometrie Knoopova indentoru [21].

$$KHN = \frac{2P}{a^2 \left[\cot \frac{172,5}{2} \tan \frac{130}{2} \right]} \quad [-] \quad (31)$$

kde a je hodnota delší měřené úhlopříčky.

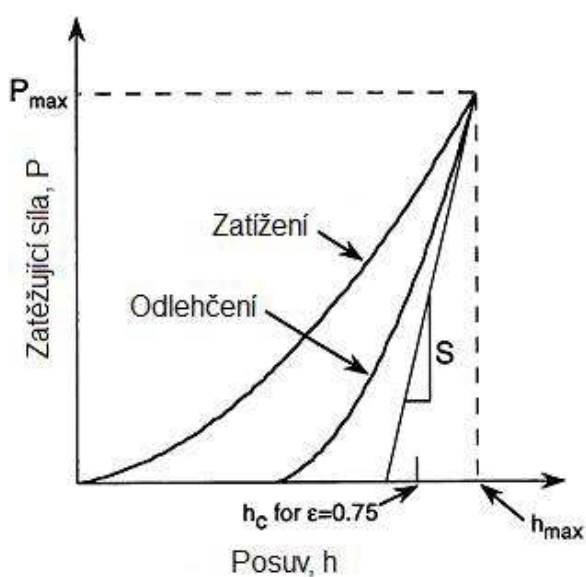
4 Instrumentovaná indentační metoda měření tvrdosti

Výše uvedené metody měření tvrdosti jsou výhodné především z hlediska jednoduchosti použití, ovšem ne vždy jsou dostačující. Proto byla vyvinutá tzv. instrumentovaná indentační zkouška [26]. Díky této metodě lze získat mnohem více informací o materiálu, než při klasických tvrdostních zkouškách. Lze určit např. modul pružnosti v tahu, lomovou houževnatost křehkých materiálů, tečení materiálů, práci vynaloženou na deformaci tělesa apod. Další výhodou je také menší porušení vzorku a vzhledem k použití menších průměrů indenterů se zkoušky dají považovat také za téměř nedestruktivní. Využití instrumentovaná metoda nachází mimo klasické měření tvrdosti konstrukčních materiálů i např. při zjišťování materiálových vlastností velmi tenkým vrstev materiálů. Tenké vrstvy pomocí klasických indenterů měření tvrdosti ve většině případů měřit nelze, vzhledem k neprojevující se plastické deformaci, právě potřebné k určení tvrdosti materiálu [27, 28]. Dále se tato metoda uplatňuje např. v biologii, při zkoumání tvrdosti zubů či kostí, nebo při testování polymerů, keramiky i dalších technických materiálů.

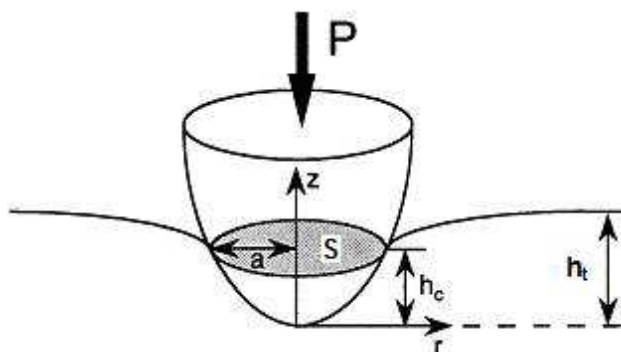
Oproti klasickým zkouškám tvrdosti, u kterých jsou veškeré hodnoty zjišťovány až po ukončení zkoušky, je největší výhoda a podstata instrumentované metody v okamžité a průběžné detekci hloubky vtisku i detekci aktuálního zatížení (*obr.12.*). Na *obr.13.* jsou dále zobrazeny základní fyzikální veličiny indentačního testu. Samotné měření se provádí na univerzálním tvrdoměru, který využívá různých indenterů. Volba použití toho správného závisí na materiálu zkoumaného vzorku. Velikost průměru indentačního tělíska se volí v závislosti na tloušťce vzorku, síle materiálu a na místě zkoumané mikrostruktury [29]. Nejčastějšími indentory jsou Berkovich, Vickers, Knoop a Brinell. Při použití Brinellovi kuličky se dá vyhodnotit především mez kluzu či zpevnění materiálu a to vzhledem k přesnému rozeznání elastické deformace od plastické [30]. Proto se Brinellův indenter využívá u tvárných materiálů, kde je přechod mezi elastickou a plastickou deformací po odlehčení vnikacího tělíska ve zkoušeném vzorku, určen vznikem jen nevratně plastických deformací. Mezi zkoušené materiály využívající Brinellův indenter, patří především feritické oceli, nerezavějící oceli či slitiny hliníku. Průměr kuličky, která je vyrobena z karbidu, se pohybuje od 0,254 do 1,575 mm [31].

Měřicí přístroj (tvrdoměr) je napojený na počítač, který obsahuje software pro přesné sledování a zaznamenávání všech hodnot v průběhu zkoušky. Počítačový software dokáže např. dokanale zhodnotit skutečnou plastickou deformaci i skutečné napětí, pomocí elastické a plastické analýzy [31]. Přesnou detekci zatížení i hloubky vniknutí zaznamenávají snímače

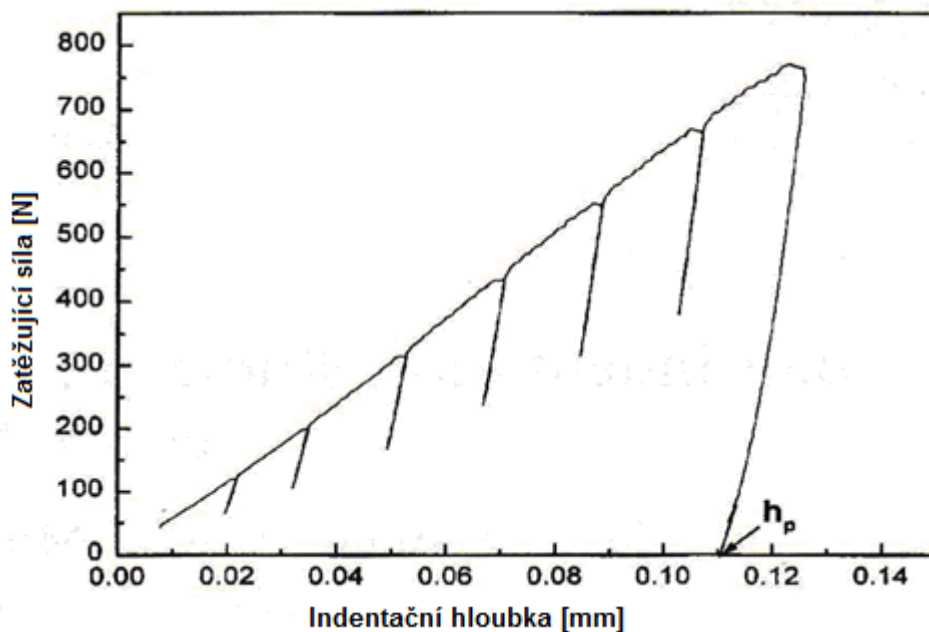
s vysokým rozlišením. Indentor je řízen elektro - mechanicky a díky mikrosenzoru dochází k přesnému snímání zatěžujícího napětí i průniku indentoru do materiálu. Měřené hodnoty jsou v průběhu zkoušky vynášeny do grafické závislosti zatěžující síla - indentační hloubka (*obr.14.*). Vztah mezi napětově - deformační charakteristikou z indentačního testu a napětově - deformační křivkou danou tahovou zkouškou pro stejný materiál, lze vidět na *obr.15.* Lze sledovat vynikající korelaci mezi oběma metodami, která značí dobrou reprezentativnost výsledků mechanických vlastností zkoušeného materiálu, získaných z indentační instrumentované zkoušky.



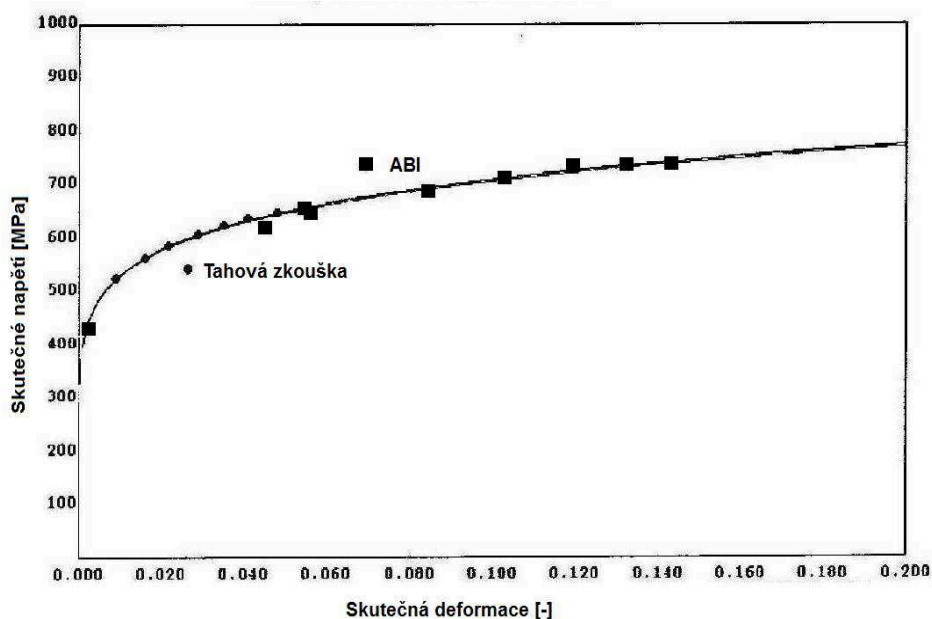
Obr.12. Typická závislost $P - h$ s vyznačením základních experimentálních veličin, kde h_c je tzv. kontaktní hloubka, h_{max} je maximální hloubka indentace a P_{max} je maximální zatěžující síla indentace [32].



Obr.13. Základní fyzikální veličiny indentační instrumentované zkoušky, kde P je zatěžující síla, S je předpokládaná kontaktní plocha, h_c je kontaktní hloubka, h_t představuje maximální hloubku indentace a a je poloměr kruhového kontaktu [32].

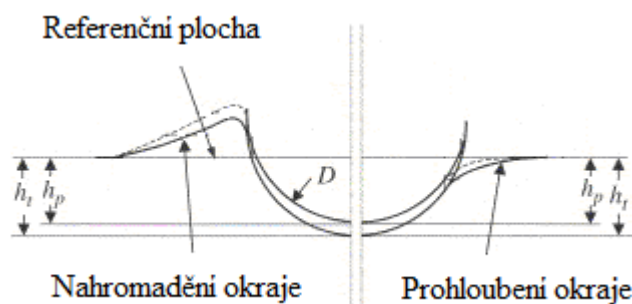


Obr.14. Příklad indentační křivky slitiny 625 měřené při pokojové teplotě [32].



Obr.15. Srovnání grafické závislosti napětí - deformace z tahové zkoušky a z indentačního testu ("ABI") [31].

Přesnost grafů a měření závisí na mnoha faktorech, které mohou výsledky negativně ovlivnit. Patří mezi ně nastavení přístroje, umístění vzorku, dokonalé rovný a připravený vzorek, velikost vtisku, nečistoty na ploše vzorku, zbytkové napětí a mnoho dalších. Co také může nepříjemně ovlivnit výsledky měření jsou efekty nahromadění okraje ("pile-up") a prohloubení okraje ("sink-in") (obr.16.).



Obr.16. Efekty nahromadění a prohloubení okraje [33].

K efektu nahromadění okraje dochází v případě velkého zpevnění materiálu a to při malém poměru mezi kombinovaným modulem pružnosti (33) a mezí kluzu. K efektu prohloubení okraje dochází u materiálů s objevující se výraznou plastickou deformací, které mají zároveň malý poměr mezi kombinovaným modulem pružnosti a mezí kluzu [27].

Přepočty hodnot z výsledků instrumentované tvrdosti [26] na napěťově - deformační charakteristiku, se provádí pomocí matematických modelů. Zjištěné pevnostní charakteristiky (např. mez kluzu materiálu), jsou poté porovnávány se stejnými skalárními veličinami získanými z tahové zkoušky. Kromě mechanických vlastností, které korelují s tahovou zkouškou, se dají určit pomocí indentační metody také lomové charakteristika zkoumaného vzorku. Tyto hodnoty se získávají při různých teplotách zkoušení, které se pohybují od cca - 160 °C do cca 290 °C.

4.1 Hertzova teorie elasticity

První, kdo se zabýval stykem dvou těles, byl Heinrich Hertz, proto v následující části práce bude uvedeno několik jeho základních vztahů. Základem Hertzovy teorie [21, 27, 28] bylo určení rozložení tlaku při kontaktu mezi tuhou koulí a rovinnou plochou. Došel k závěru, že poloměr kruhového kontaktu se vztahuje k zatížení tělíska P , poloměru vnikacího tělesa R a k elastickým vlastnostem materiálu (32) [21]:

$$a^3 = \frac{3}{4} \frac{PR}{E^*} \quad [\text{mm}] \quad (32)$$

kde E^* je kombinovaný modul indentoru v [MPa] a je rovný vzorci (33):

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad [1/\text{GPa}] \quad (33)$$

kde E_s je elastický modul vzorku [GPa];
 ν_s je Poissonovo číslo vzorku [-];
 E_i je elastický modul indentoru [GPa];
 ν_i je Poissonovo číslo indentoru [-].

Jak vyplývá z rovnice (33) Hertz [27, 28] počítal pouze s lokální elastickou deformací, která se projevuje maximálně u velmi tenkých vrstev materiálů. Pro maximální tahové napětí vzniklé mimo přímý kontakt určil rovnici (34) [21]:

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{(1-2\nu_s)}{2\pi} \right) \left(\frac{4E^*}{3} \right)^{2/3} P^{1/3} R^{-2/3} \quad [\text{MPa}] \quad (34)$$

Bral také v úvahu pouze normální tlak p_m a nerespektoval kontaktní tření mezi indentorem a vzorkem. Tlak p_m (35), zvaný také jako střední kontaktní tlak či indentační napětí, je dán podílem vynaloženého zatížení a kontaktní plochy. Dosazením do (32), pak p_m získává tvar (36) [21]:

$$p_m = \frac{P}{\pi a^2} \quad [\text{Pa}] \quad (35)$$

kde a je kontaktní poloměr (poloměr indentoru) v [mm].

$$p_m = \left[\frac{4}{3} \frac{E^*}{\pi} \right] \frac{a}{R} \quad [\text{Pa}] \quad (36)$$

kde $\frac{a}{R}$ je poměr značící indentační deformaci [-].

Vztah mezi p_m a hodnotu $\frac{a}{R}$ pak nastiňuje napěťově - deformační chování materiálu a je důležitý k sestavení výsledné krivkové závislosti právě mezi zjištěným napětím a deformací.

4.2 Základní podmínky Taborovy teorie elasticko - plastického chování materiálů

Vzhledem k tomu, že Hertz [21, 27, 28] počítal pouze s elastickým chováním materiálu bez tření a plastickou deformaci ignoroval, není tato teorie z hlediska reálného zkoumání mechanických vlastností materiálů dostačující. První kdo se blíže zabýval korelací mezi výsledky indentační metody využívající kulového indentoru, a výsledky z jednoosých tahových zkoušek, byl D. Tabor [30]. Oproti Hertzovi tak ve svých teoriích počítal jak s elastickým, tak s plastickým chováním materiálu. Dle Tabora [29, 30] je tato korelace možná při splnění tří základních podmínek:

- I. Křivky závislosti skutečného napětí a skutečné plastické deformace získané z napětí a tlaku při indentačním testu a tahové zkoušky musí být podobné;
- II. Deformace při indentaci musí korelovat se skutečnou plastickou deformací z jednoosého tahového testu;
- III. Musí být splněná korelace mezi středním kontaktním tlakem kulového indentoru a napětím, které je funkcí plastické deformace při tahové zkoušce.

Přes první Taborovu podmínku, napětíově deformační závislost ukazuje korelaci hodnot pouze do meze kluzu. A to z toho důvodu, že při indentaci nedochází k zúžení vzorku při plastické nestabilitě materiálu, jak je tomu u tahové zkoušky.

4.3 Teorie výpočtů mechanických vlastností z instrumentovaného indentačního testu

Jak už bylo naznačeno výše, výpočty k určení mechanických vlastností materiálu vychází ze základů Hertzovi teorie [21, 27, 28] a jeho následovatelů, mezi které patří především D. Tabor [30]. Co je důležité ještě zmínit je to, že při výpočtech hodnot z instrumentální metody, se počítá s přesným určením počátečního kontaktu indentoru s povrchem vzorku.

Po odtížení vzorku se nejprve musí určit průměr vzniklý při plastické deformaci vzorku (průměr vtisku) d_p (37) a to z tzv. plastické hloubky h_p [29, 31]. Určení správné hodnoty d_p je velice důležité z hlediska dalšího stanovení mechanických vlastností. Jelikož je ruční vyhodnocování rovnice (37) velmi zdlouhavé a může se snadno chybovat, využívá se k přepočtům matematických počítačových softwarů.

$$d_p = \sqrt[3]{2,735P \left(\frac{1}{E_i} + \frac{1}{E_s} \right) D \left\{ \frac{h_p^2 + 0,25d_p^2}{h_p^2 + 0,25d_p^2 - h_p D} \right\}} \quad [\text{mm}] \quad (37)$$

kde D je průměr kuličkového indentoru [mm].

Ještě je potřeba zdůraznit, že pro dokonalé určení hodnoty d_p a tedy i dalších mechanických charakteristik, by se při indentaci neměly objevit efekty nahromadění a prohloubení okraje vzorku. U standardní tahové zkoušky je jednoosá deformace omezena na téměř konstantní objem zatěžované části vzorku. Na počátku je materiál deformovaný elasticky, následuje vznik a rozvoj plastické deformace a postupně dochází k homogennímu růstu deformace a to až do zúžení vzorku. Elastická a plastická deformace od sebe nejsou plně zřetelně odděleny. U testu indentačního se z rostoucí hloubky vtisku postupně detekuje i rostoucí objem zkoušeného materiálu. Elastická i plastická deformace zde probíhají současně v průběhu celé zkoušky a proto jsou i lépe identifikovatelné. Např. na *obr.15*. lze sledovat, postupně sedm indentačních cyklů, které představují sedm nepřetržitých procesů zpevňování materiálu [29]. Přesné stanovení meze kluzu je tedy při indentačním instrumentovaném měření, rozloženo na celou křivku zatížení - posunutí razníku. Zatížení je zvyšováno přibližně lineárně s hloubkou penetrace, což je důsledkem dvou nelineárních souběžně probíhajících procesů, tedy nelineárního nárůstu aplikovaného zatížení a vnikací hloubky. Proto, aby došlo k dalšímu zpevnění materiálu, je třeba dalšího nelineárního zvětšování zatížení kulového indentoru.

Použitím karbidové kuličky indentoru a zkoušeného materiálu z některé běžně používané oceli, bývá elastický modul indentoru podstatně vyšší než modul zkoumaného vzorku. Z toho důvodu pod indentorem vzniká jen velmi malá plastická deformace. Tabor [29, 30, 31] proto stanovil korelaci pro kuličkový indentor mezi skutečnou plastickou deformací ε_p získanou při jednoosé tahové zkoušce a mezi indentační deformací $\frac{d_p}{D}$ (38):

$$\varepsilon_p = 0,2 \left(\frac{d_p}{D} \right) \quad [-] \quad (38)$$

kde 0,2 je hodnota maximální deformace zjištěné indentační metodou. Při $d_p = D$ je skutečná plastická deformace ε_p rovna 20 %.

Pro zjištění počátečních hodnot indentace se při analýze deformace využívá vztah obdobný Meyerovy tvrdosti (29) [21]. Jedná se o rovnici (39), která představuje hodnotu normálního tlaku p_m působícího na materiál v průběhu testu [29, 31]:

$$p_m = \frac{4P}{\pi d_t^2} \quad [\text{Pa}] \quad (39)$$

kde P je indentační zatížení v [N] a je rovno $S \cdot h_t$, kde S je sklon křivky a h_t je maximální indentační hloubka;

d_t je maximální průměr vtisku v [mm] a jeho hodnota je rovna (40):

$$d_t = 2(Dh_t - h_t^2)^{0,5} \quad [\text{mm}] \quad (40)$$

Při výpočtech nelze zanedbat také smykovou složku [29]. Ke smykovému napětí dochází pod zkušební plochou vzorku při působení napětí podél osy indentoru. Tzv. jednoosé tokové napětí je dáno vztahem (41) [28]. Hodnota tohoto napětí je oproti střednímu indentačnímu tlaku menší z toho důvodu, že plastická deformace materiálu je omezena na okolní elastický materiál.

$$\sigma_\delta = \frac{p_m}{\delta} \quad [\text{MPa}] \quad (41)$$

kde δ je tzv. nucený faktor, závislý na plastické zóně vyvinuté pod indentorem (neboli deformace indentačního materiálu).

δ je konstantní po celém plastickém toku, ke kterému při indentaci dochází a nemění se ani s dalším nárůstem indentačního zatížení. Tzn. že se hodnota δ rovnoměrně zvětšuje se zvětšující se indentační silou a určuje se z aktuálního indentačního zatížení a související hloubky. Číselně se nucený faktor pohybuje od 1,12 do 2,87. α_m [29, 31]:

$\delta = 1,12$ pro $\phi = 1$ (zde probíhá nukleace plastické zóny)

$\delta = 1,12 + \tau \ln \phi$ pro $1 < \phi < 27$ (tento průběh představuje přechod k rozvoji plastické zóny)

$\delta = 2,87 \cdot \alpha_m$ pro $\phi > 27$ (při tomto stavu dochází k plně rozvinuté plastické zóně).

Hodnota parametru ϕ se dá vypočítat z (42), ale dá se určit také pomocí softwaru, který je součástí indentační instrumentované metody [29].

$$\phi = \frac{\varepsilon_p E_s}{0,43 \sigma_t} \quad [-] \quad (42)$$

kde σ_t je skutečné napětí [MPa]

Hodnota konstanty τ se dá určit pomocí vzorce (43) [29]:

$$\tau = \frac{(2,87 \alpha_m - 1,12)}{\ln(27)} \quad [-] \quad (43)$$

kde α_m je parametr citlivý především na rychlost deformace a na charakteristikách způsobujících zpevnění materiálu v průběhu zkoušky. Pohybuje se od hodnoty 0,9 do 1,25 v závislosti na druhu materiálu a pro malé rychlosti deformací má typickou hodnotu rovnou 1.

Homogenní část plastického toku křivky je dána stejně jako v případě tahové zkoušky, Ramberg - Osgoodovým zákonem (19): $\bar{\sigma} = K \cdot \varepsilon_p^n$. Tato rovnice je platná pouze za předpokladu linearit mezi $\ln \bar{\sigma}$ a $\ln \varepsilon_p$ [29]. Je-li: $\varepsilon_p = n$, pak vztah (19) představuje skutečnou mez pevnosti v tahu.

Pro inženýrské použití je hodnota meze pevnosti v tahu dána (44):

$$S_{UTS} = K \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad [\text{MPa}] \quad (44)$$

kde $e = 2,71$.

Při napětích zahajující plastickou deformaci ($\phi = 1$), jsou jejich hodnoty velmi malé, a proto se neurčují z rovnice (19). Vzhledem jen k minimální dosažené deformaci se pro odhad meze kluzu, využívá vztah složený ze středního normálního tlaku a vzniklého průměru

vtisku po indentaci. Tento vztah je dán Meyerem [21] a datové body ze všech indentačních cyklů (s max. hodnotou $\frac{d_t}{D} = 1$), jsou upraveny lineární regresní analýzou dle (45) [29]:

$$\frac{P}{d_t^2} = K \left(\frac{d_t}{D} \right)^{m-2} \quad [\text{MPa}] \quad (45)$$

kde m je Meyerův exponent a obecně je jeho hodnota mezi 2 a 2,5;
 K je materiálový parametr získaný z regresní analýzy [MPa].

Mez kluzu σ_y (46) je úměrná Meyerovy tvrdosti ($4P/\pi d^2$) [21], kde d je konečný průměr vtisku [29]:

$$\sigma_y = \beta_m \cdot K \quad [\text{MPa}] \quad (46)$$

kde β_m je konstanta pro danou třídu materiálu a je získaná z mezí kluzu zjištěných při standardních tahových zkouškách.

Pomocí vztahu (47), lze získat také hodnotu maximálního napětí (47) [29]:

$$\sigma_t = \frac{4P}{\pi d_p^2 \delta} \quad [\text{MPa}] \quad (47)$$

Vhledem ke znalostem a informacím o elasticko - plastickém chování materiálu při indentační metodě, se indentační zkouška [26] stává velice výhodná a reprezentativní. Ze vzniklé závislosti napětí - deformace korelující s křivkou z tahové zkoušky, lze určit důležité mechanické a materiálové vlastnosti. Jak už bylo řečeno v úvodu této práce, přesto určitě nejde o nahrazení klasických tahových zkoušek běžných konstrukčních materiálů. Výhoda tohoto určování může být především u křehkých materiálů, či těžko dostupných objemnějších vzorků pro zkoušení. Jelikož existuje i přenosné zařízení pro měření instrumentované indentační tvrdosti [26], je možné zkoumat energetická zařízení i přímo za provozu. To je velice výhodné především v těžko přístupných místech zařízení, pro odběr vzorků, ale také z hlediska finančních úspor, kdy odstávkou zařízení dochází ke zbytečným finančním ztrátám.

5 Experimentální část

5.1 Měření instrumentované tvrdosti na obsáhlé provozní expozici

5.1.1 Příprava vzorků

Pro reprezentativní výsledky měření je důležité mít především pečlivě připravené experimentální vzorky. Pro tuto práci bylo k dispozici velké množství přetržených zkušebních těles (okolo 160 ks), již podrobených jednoosé tahové zkoušce [17]. Tato tělesa byla odebrána z komponent zařízení tlakového okruhu klasické elektrárny, pracujících při teplotách okolo 500 až 550 °C, po dobu až 190 000 hodin. Z tahových zkoušek byly pro jednotlivé vzorky k dispozici také záznamy zjištěných mechanických vlastností.

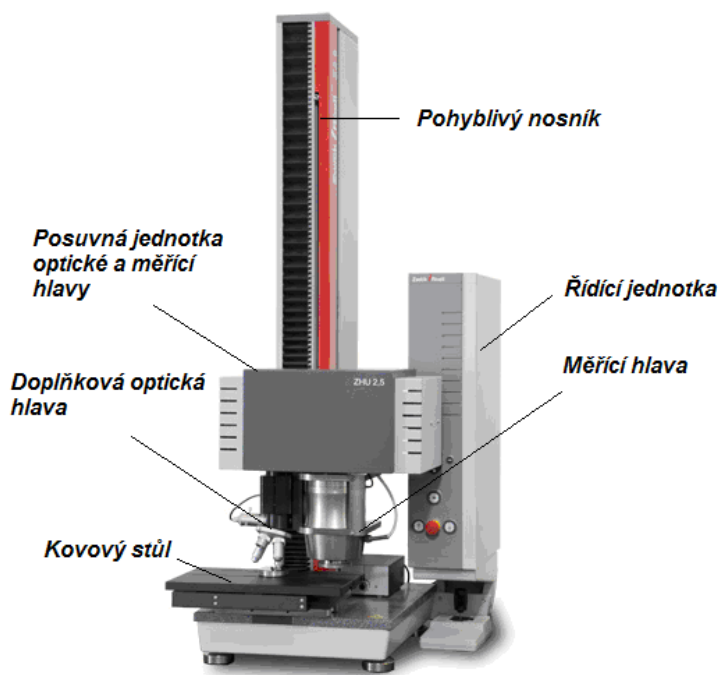
Pro měření instrumentované tvrdosti byly již přetržené vzorky upraveny řezáním, zabakelitováním, broušením a vybraná zkušební tělesa byla také dodatečně vyleštěna. K zabakelitování došlo jen u některých vzorků (asi 70 ks) a to dvousložkovým rychleschnoucím akrylátovým přípravkem. Z toho důvodu, že u vzorků v akrylátové výplni docházelo ke kolísavým výsledkům instrumentované indentační zkoušky, nebyla zalita všechna zkušební tělesa. Akrylátová výplň vzorků způsobovala nepřesnosti výsledků kvůli nepřímému kontaktu "kov na kov", při usazení vzorku na kovový stůl měřicího přístroje. Leštění povrchů vzorků bylo provedeno také jen v některých případech, a to proto, že drsnost povrchu (již jemně přebroušeného) nemá významný vliv na výsledné veličiny instrumentovaných indentačních zkoušek. Z toho důvodu byly vybroušené povrchy k hodnocení mechanických vlastností materiálu dostačující.

Vynechání fází zabakelitování a leštění, přispělo kromě větší přesnosti měření, také k významné časové úspoře při přípravě velkého množství vzorků.

5.1.2 Popis zkušebního zařízení a samotného měření tvrdosti

Po dokonale připravených vzorcích následovala samotná instrumentovaná metoda měření [26]. Instrumentovaná tvrdost byla měřena na přístroji značky Zwick/Roell, na tvrdoměru ZHU zwicki-Line [34]. Tento velice flexibilní přístroj má rozmanité využití v oblasti měření tvrdosti. Hlavní součástí tvrdoměru ZHU zwicki-Line (*obr.17.*) je měřicí hlava uložená na pohyblivém nosníku. Uvnitř měřicí hlavy je zabudovaný digitální systém pro

měření dráhy, snímač síly a vyměnitelný vnikací indentor s dotykovým čidlem. Další částí přístroje je doplňková optická hlava, složená z měřicího mikroskopu a posuvné jednotky pro změnu nastavení pozice mezi mikroskopem a měřící hlavou. Celý přístroj je napojený na počítač, jehož software zachycuje a ukládá celý průběh zkoušky.



Obr.17. Tvrdoměr ZHU zwicki-Line (upravený z českých webových stránek firmy Zwick/Roell [34]).

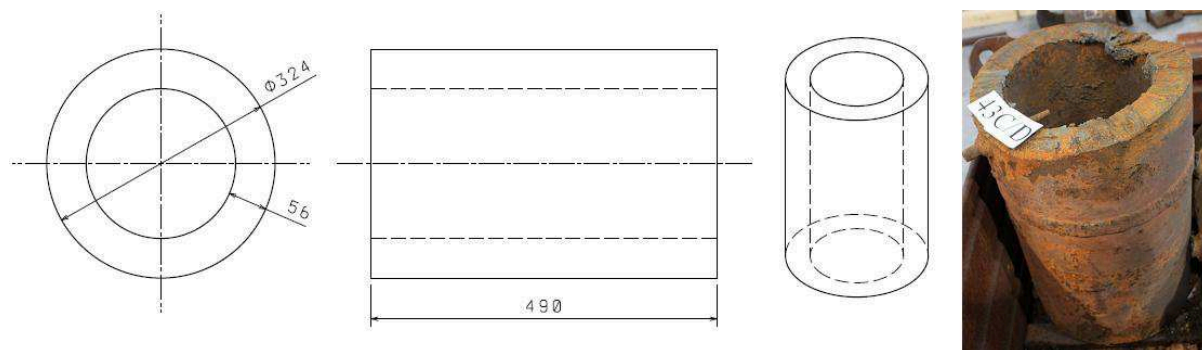
Po ustavení vzorku na kovový stůl přístroje a po nastavení základních parametrů (počtu zatěžujících cyklů, velikosti zatěžující síly apod.), došlo k samotnému počítačem řízenému měření. Celý průběh zkoušky byl zaznamenáván a hodnoty byly uloženy pro vyhodnocení potřebných pevnostních charakteristik.

5.1.3 Popis vybraných komponent k určení napěťově deformační charakteristiky

Vzhledem k rozsahu této práce byla ke zpracování dat a dokumentace vybrána, ze všech naměřených vzorků, zkušební tělesa pro tři různé komponenty energetických zařízení tlakového okruhu. Jednalo se dohromady o 9 vzorků pro každou komponentu. Vždy po třech ve třech úrovních tloušťky materiálu. Vzhledem k zanedbatelnému rozptylu hodnot však tyto výsledky byly pojaty jako homogenní celek a pro porovnání s hodnotami instrumentované tvrdosti zprůměrovány. Veškeré zkoušky mechanických vlastností byly prováděny při 20 °C.

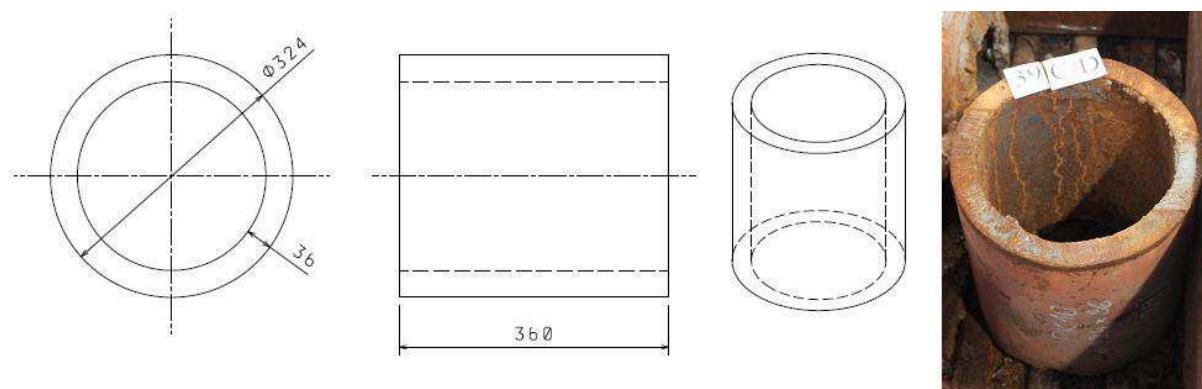
Vybranými komponenty byly:

1. Výstupní komora výstupního ohříváku - dále jen *K1*, vyrobená z oceli 15 128.5 (*obr.18.*):



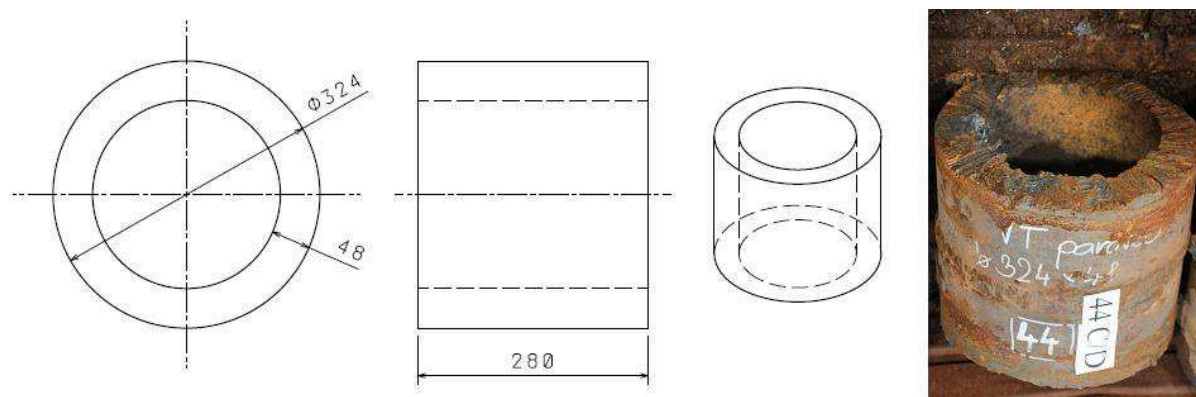
Obr.18. Schematické a reálné znázornění části z K1.

2. Výstupní komora šotového přehříváku - dále jen *K2*, vyrobená z oceli 15 128.5 (*obr.19.*):



Obr.19. Schematické a reálné znázornění části z K2.

3. Výstupní parovod VT páry - dále jen *K3*, vyroben z oceli 15 128.5 (*obr.20.*):



Obr.20. Schematické a reálné znázornění části z K3.

Pro představu jsou v *tab.4.* uvedeny také výsledné hodnoty chemické analýzy, provedené na zkušebních vzorcích po dlouhodobé provozní expozici všech tří komponent energetických zařízení elektrárny. Kromě chemického složení těchto tří komponent je v *tab.4.* uvedeno pro porovnání také chemické složení pro hotový výrobek z oceli 15 128 dle normy ČSN 41 5128 [11]. Hodnota obsahu hliníku v oceli dle ČSN 41 5128 je v *tab.4.* uvedena pro tavbu materiálů, které pracují při pracovních teplotách nad 500 °C. Vyšší obsah hliníku u K2 (0,031 %) může být způsoben dlouhodobou (v řádu 100 000 hodin) provozní expozicí v obtížných pracovních podmínkách za vysokých tlaků a teplot, při které může docházet ke strukturním i určitým chemickým (zejména na exponovaném povrchu) změnám v materiálu.

Tab.4. Průměrné zjištěné chemické složení K1, K2 a K3 a normované chemické složení oceli 15 128.

hm. %	K1	K2	K3	ČSN 41 5128
C	0,122	0,134	0,130	0,10 až 0,20
Mn	0,560	0,636	0,583	0,40 až 0,80
Si	0,297	0,336	0,276	0,12 až 0,45
P	0,009	0,010	0,115	max. 0,040
S	0,0407	0,0185	0,0193	max. 0,040
Ni	0,094	0,078	0,107	-
Cr	0,526	0,523	0,545	0,45 až 0,85
Mo	0,468	0,461	0,445	0,35 až 0,70
V	0,310	0,291	0,310	0,19 až 0,40
Al celk.	0,011	0,031	0,011	max. 0,025
N	0,0078	0,0087	0,0076	-
As	0,008	0,011	0,010	-
Sn	0,003	0,004	0,007	-
Sb	0,002	0,002	0,002	-

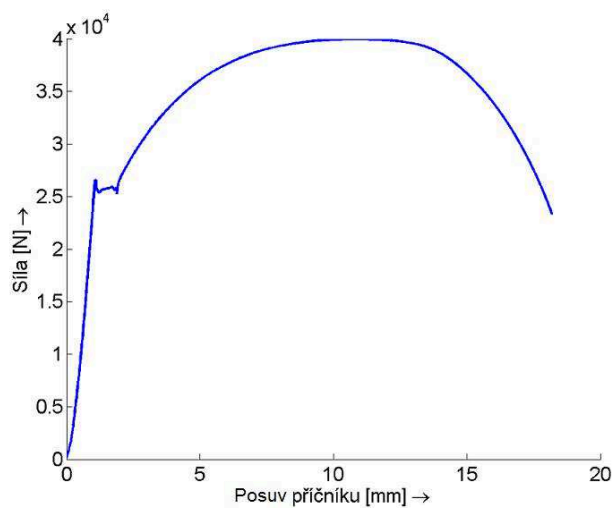
5.2 Vyhodnocení tahových zkoušek materiálů po dlouhodobé provozní expozici

Z tahových zkoušek bylo k dispozici 9 vzorků odebraných z různých oblastí jednotlivých komponent energetických zařízení. Pro porovnání výsledků získaných z tahových zkoušek s výsledky získanými instrumentovanou indentační metodou, byly hodnoty všech 9-ti vzorků zprůměrovány. Výsledné hodnoty mechanických charakteristik určených tahovými zkouškami lze vyčíst z *tab.5.*

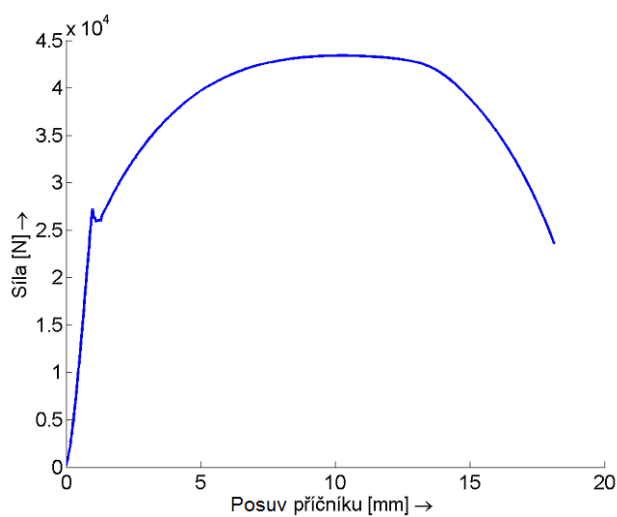
Tab.5. Výsledné hodnoty mechanických vlastností, určené tahovými zkouškami pro K1, K2 a K3.

Komponenta	Číslo vzorku	σ_y [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
K1	1	344	511	27,0	71,9
	2	339	509	28,6	73,0
	3	336	509	28,4	73,0
	4	349	507	28,8	73,0
	5	337	507	28,2	73,0
	6	339	509	28,2	71,9
	7	332	512	27	73,0
	8	325	504	28,2	71,9
	9	345	503	29,2	73,0
	<i>průměr</i>	338	508	28,2	72,6
K2	1	345	553	28,0	75,0
	2	351	555	26,6	74,0
	3	340	555	28,0	74,0
	4	344	556	24,2	74,0
	5	345	559	26,4	74,0
	6	349	557	27,8	74,0
	7	336	551	26,6	75,0
	8	364	553	28,4	75,0
	9	340	555	27,2	75,0
	<i>průměr</i>	344	555	27,3	74,0
K3	1	331	502	31,0	75,0
	2	313	502	32,0	75,0
	3	332	500	30,6	75,0
	4	323	494	30,4	76,0
	5	323	502	29,8	76,0
	6	323	499	29,0	76,0
	7	326	500	30,4	75,0
	8	316	500	30,4	75,0
	9	308	502	28,8	74,0
	<i>průměr</i>	322	500	30,0	75,0

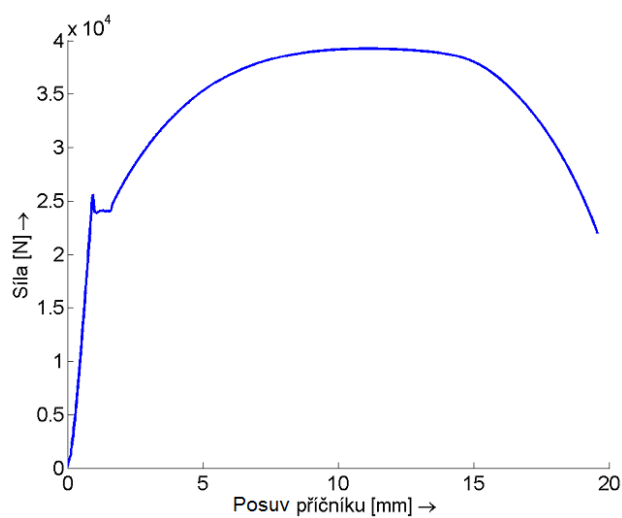
Pro každou ze tří komponent energetických zařízení, je na *obr.21.*, *obr.22.* a *obr.23.* uveden (vždy pro jedno zkušební těleso) příklad záznamu tahové zkoušky, resp. závislost zatěžující síla - posuv příčnicku. Je patrná klasická zatěžovací křivka s výraznou mezí kluzu. Charakter těchto křivek je pro všechna zkušební tělesa obdobný.



Obr.21. Grafická závislost síla - posuv příčnicku daná tahovou zkouškou pro K1.



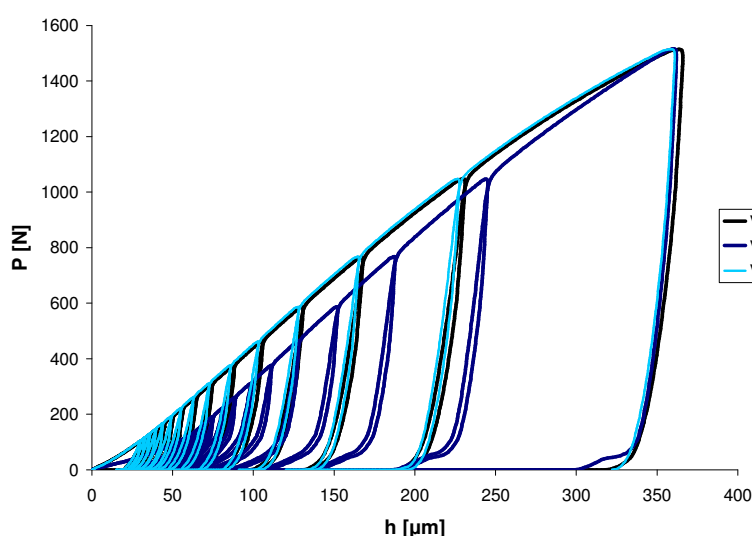
Obr.22. Grafická závislost síla - posuv příčnicku daná tahovou zkouškou pro K2.



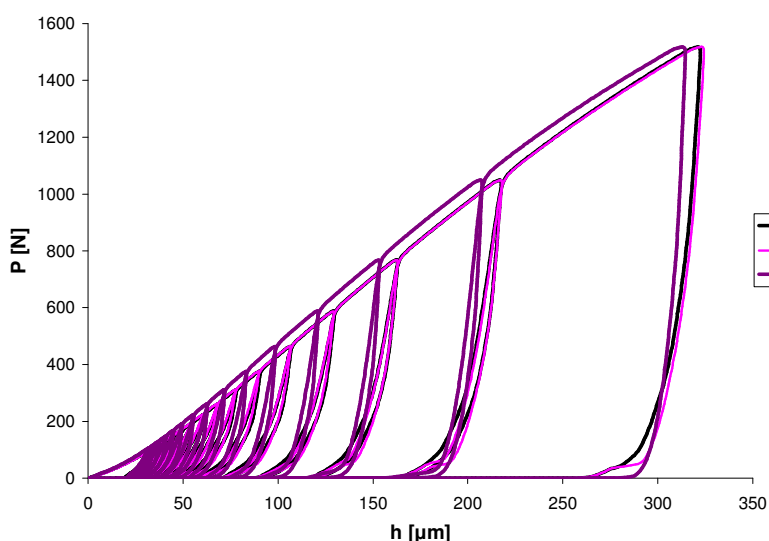
Obr.23. Grafická závislost síla - posuv příčnicku daná tahovou zkouškou pro K3.

5.3 Vyhodnocení výsledků indentační instrumentované metody

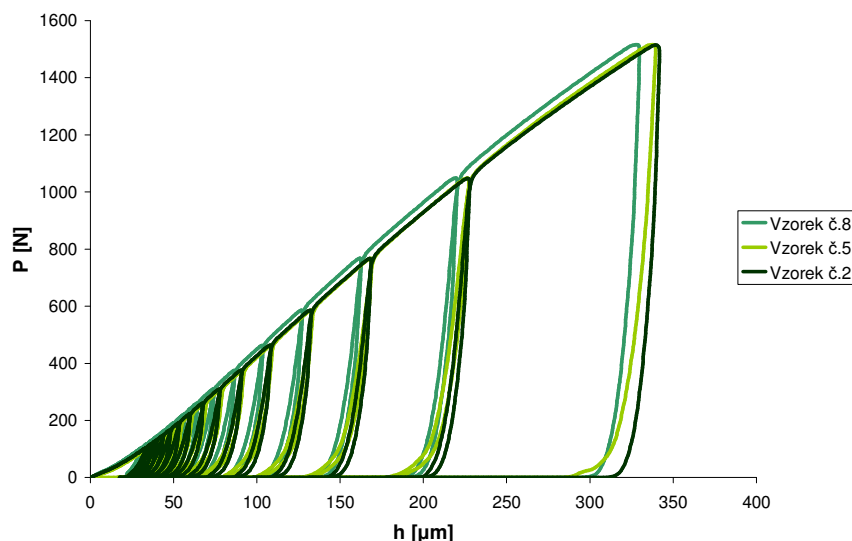
Měření indentační instrumentované metody [26] bylo prováděno při 15-ti zatěžujících cyklech, maximální zatěžující síle 1500 N a maximální indentační hloubce 350 μm . Výsledky tohoto měření, tedy grafické závislosti zatížení P - hloubka indentace h , nezbytné k vyhodnocení mechanických vlastností materiálu, jsou zobrazeny pro všechny měřené komponenty na *obr.24.*, *obr.25.* a *obr.26.* Na těchto grafických závislostech jsou pro lepší představu přesnosti měření instrumentované indentační metody, zobrazeny vždy 3 náhodně vybrané vzorky jednotlivých komponent.



Obr.24. Grafický záznam z průběhu indentačního zatěžování vzorků K1.



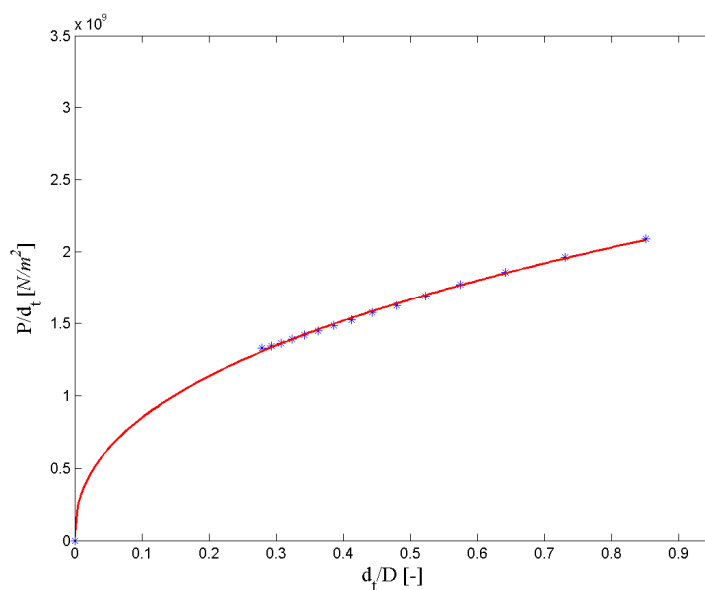
Obr.25. Grafický záznam z průběhu indentačního zatěžování vzorků K2.



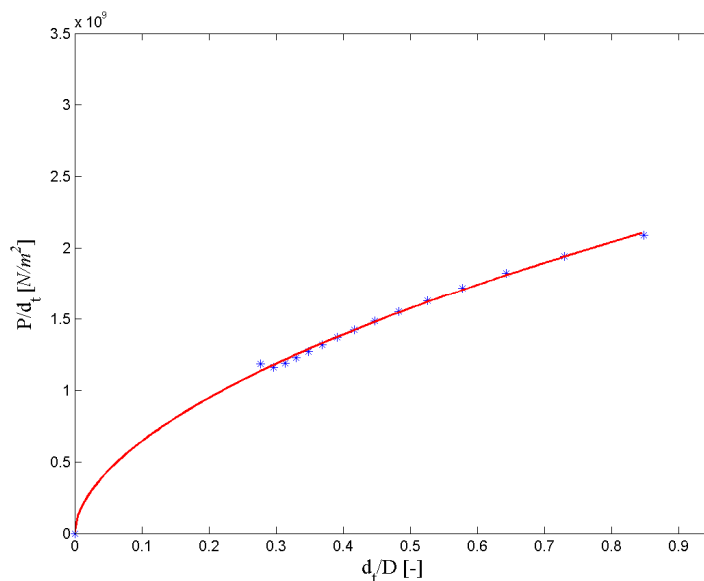
Obr.26. Grafický záznam z průběhu indentačního zatěžování vzorků K3.

Mírné odlišnosti v křivkách, které lze sledovat na *obr.24.* až *obr.26.*, mohly být způsobeny např. nějakým materiálovým vměstkem, či nečistotou na povrchu vzorku.

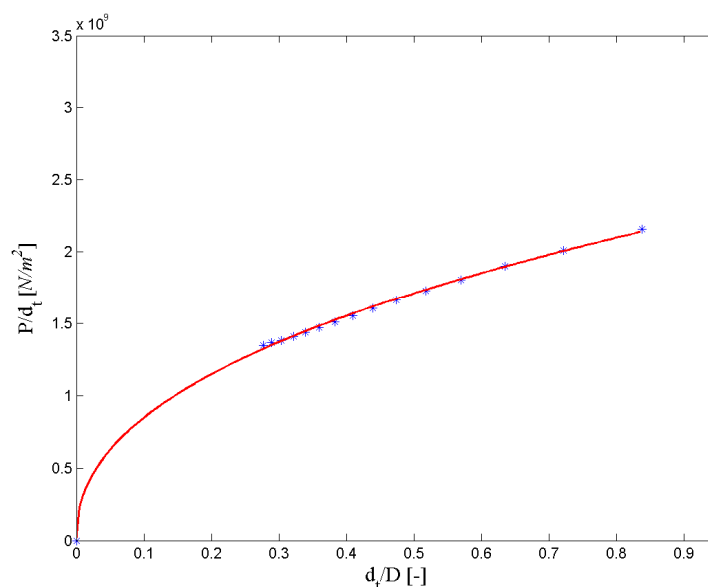
Na následujících grafických závislostech (*obr.27.* až *obr.29.*) lze sledovat jednotlivé lineární regresní analýzy vzorků všech tří komponent. Tyto lineární regrese, tvořené středním indentačním tlakem a průměrem vtisku vzniklým po indentaci, jsou nezbytné k odhadu meze kluzu zkoušeného vzorku. Výsledky získané pomocí těchto závislostí, tedy pevnostní koeficient K a exponent deformačního zpevnění n , jsou zapsány v *tab.6.*



Obr.27. Lineární regresní závislost pro K1.

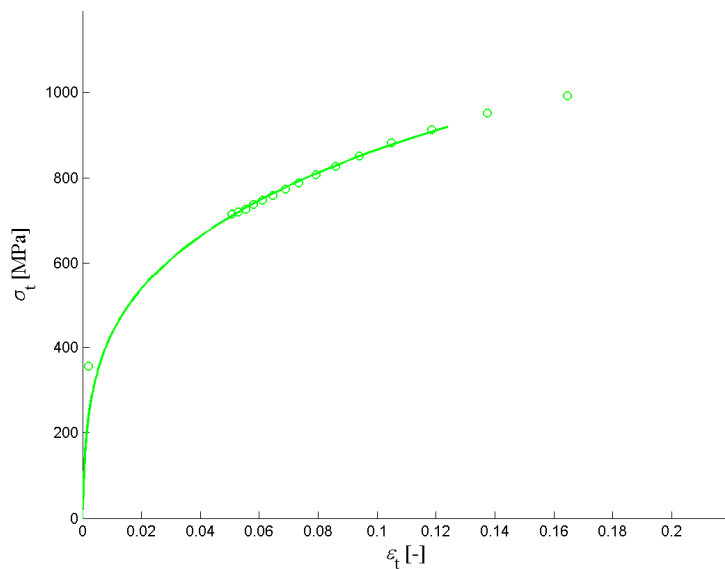


Obr.28. Lineární regresní závislost pro K2.

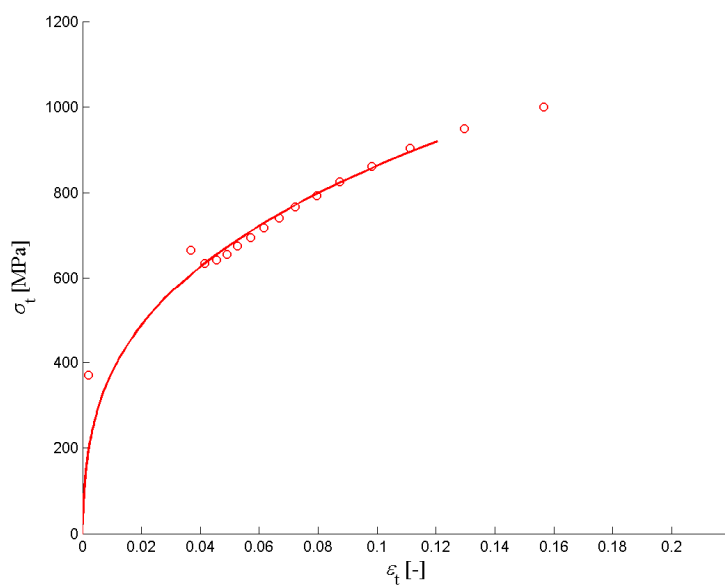


Obr.29. Lineární regresní závislost pro K3.

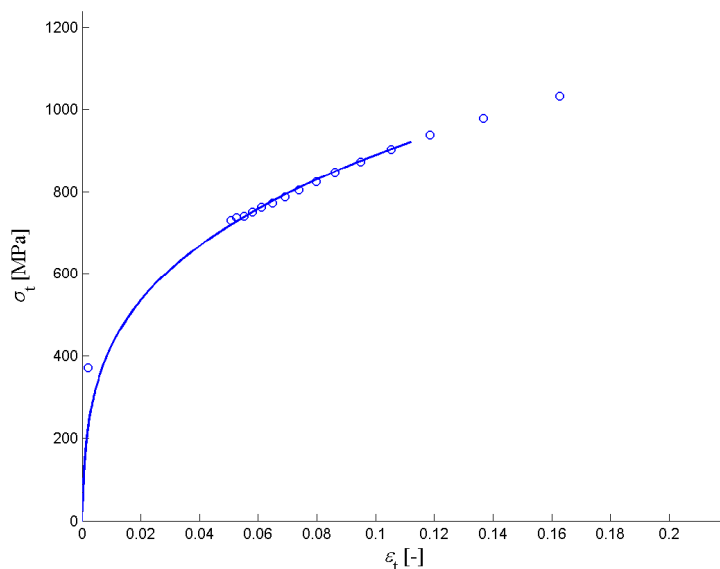
Poslední série grafických závislostí (*obr.30.*, *obr.31.* a *obr.32.*) představuje výsledné závislosti mezi skutečným napětím σ_t a skutečnou deformací tělesa ε_t . Tyto grafické závislosti představují výsledky získané na základě měření vzorků metodou instrumentované indentační zkoušky [26] a do hodnoty meze kluzu korelují s napěťově deformačními charakteristikami, získanými pomocí jednoosých tahových zkoušek [17]. Zprůměrované hodnoty odhadu mezí kluzu jednotlivých vzorků komponent K1, K2 a K3, získané na základě výpočtů z instrumentované indentační zkoušky, lze sledovat v *tab.6*.



Obr.30. Výsledná grafická napět'ově - deformační závislost K1, určená instrumentovanou indentační zkouškou.



Obr.31. Výsledná grafická napět'ově - deformační závislost K2, určená instrumentovanou indentační zkouškou.



Obr.32. Výsledná grafická napět'ově - deformační závislost K3, určená instrumentovanou indentační zkouškou.

Pro sestavení všech předchozích grafických závislostí a k odhadu pevnostních charakteristik, byly aplikovány výpočtové vzorce z teoretické části této práce (*kapitola 4*). Byly použity především vztahy vyvozené Hertzovou [21, 27, 28] a Taborovou [30] teorií.

V následující tabulce (*tab.6.*) jsou zapsány výsledné hodnoty základních pevnostních charakteristik, získaných metodou indentační instrumentované tvrdosti [26]. Veškeré hodnoty jsou zprůměrovány, ze všech naměřených vzorků komponent energetických zařízení tlakového okruhu elektrárny.

Tab.6. Zprůměrované výsledné hodnoty pevnostních veličin z instrumentované indentační zkoušky.

	σ_y [MPa]	K [MPa]	n [-]
K1	357	1664	0,279
K2	369	1902	0,337
K3	370	1790	0,299

Pro stanovení a dokázání korelační závislosti napět'ově deformačních charakteristik tahové zkoušky a instrumentované indentační metody, bylo zapotřebí určit hodnoty mezí kluzu materiálu σ_y oběma zkušebními metodami. Porovnání těchto hodnot lze vidět v *tab.7.:*

Tab.7. Srovnání hodnot mezí kluzu tahové zkoušky a instrumentované indentační metody jednotlivých komponent.

	σ_y [MPa] <i>Tahová zkouška</i>	σ_y [MPa] <i>Indentační metoda</i>
K1	338	357
K2	344	369
K3	322	370

Porovnáním výsledných mezí kluzu (*tab.7.*) lze vidět rozdíly v řádu desítek MPa. Vyšší hodnoty jsou vždy u mezí kluzu získaných indentační metodou. Nejmenšího rozdílu je dosaženo u K1, kdy je rozdíl hodnot asi 19 MPa. U K2 je tento rozdíl roven 25 MPa a největší rozdíl hodnot mezí kluzu dosahuje K3 a to 58 MPa. Hodnoty získané z tahových zkoušek i hodnoty určené indentační metodou byly vždy brány jako aritmetický průměr všech naměřených a vypočítaných hodnot.

K určení přesnější korelace těchto hodnot by mohlo dojít např. při možnosti většího počtu měření („vpichů“) na jednotlivých vzorcích. To však vzhledem k velikosti zkoušených těles a k nutnosti dodržení všech parametrů a norem při měření, nebylo možné. Rozdíly v těchto hodnotách mohou být způsobeny také např. tím, že instrumentovaná indentační zkouška je oproti zkoušce tahové, velice citlivá na přesné určení počátečního kontaktu indentoru s povrchem vzorku. Dalšími faktory, které mohly ovlivnit výsledky měření, jsou např. nastavení přístroje, příprava zkušebních těles, správné umístění zkoumané oblasti vzorku na měřicí přístroj, či např. zbytková pnutí v materiálu. Při porovnání všech mechanických veličin určených jednoosou tahovou zkouškou (*tab.5.*), je také vidět, že jsou výsledné hodnoty mezí kluzu jednotlivých měření dosti kolísavé, oproti ostatním pevnostním charakteristikám (např. více stabilní mezi pevnosti *Rm*). Tyto kolísavé výsledné hodnoty, také mohly ovlivnit výslednou průměrnou hodnotu meze kluzu a celkové porovnání s hodnotami mezí kluzu získanými instrumentovanou indentační metodou.

6 Závěr

Materiály určené pro použití v energetice, v tomto případě žárupevné oceli, pracují v náročných provozních podmínkách. Je tedy nutno sledovat jejich napěťově deformační charakteristiky v průběhu celé jejich životnosti. Tato práce se v teoretické rovině zabývala standardními způsoby zjišťování těchto vlastností s důrazem na metody nové, progresivní. Důraz byl kladen především na možnosti instrumentované indentační metody a to včetně výpočtové studie mechanických veličin.

Cílem experimentální části práce bylo vyhodnotit napěťově deformační charakteristiky zkoušených materiálů, s využitím instrumentované indentační metody dle normy [26]. Při vyhodnocování byly aplikovány především vztahy Hertzovy [21] a Taborovy [30] teorie. Odhad pevnostních charakteristik byl proveden na vzorcích komponent energetických zařízení elektrárny, pracujících v creepových oblastech. Vybranými měřenými komponenty byly: výstupní komora výstupního ohříváku, výstupní komora šotového přehříváku a výstupní parovod VT páry. Na vzorcích těchto komponent byly nejprve vyhodnoceny výsledky jednoosých tahových zkoušek a následně byly sestaveny a vyhodnoceny napěťově deformační charakteristiky získané instrumentovanou indentační metodou. Hlavním porovnávacím parametrem korelace výsledků, byla mez kluzu. Ta byla zvolena ze dvou základních důvodů: tahový diagram dává pouze smluvní hodnoty napětí a deformace, oproti instrumentované indentační zkoušce, která počítá s hodnotami skutečnými, a v průběhu indentace nedochází v materiálu k plastické nestabilitě, jako je tomu u zkoušky tahem. Z toho vyplývá, že korelace výsledků je možná právě a pouze do meze kluzu. Nad touto mezí dochází k významným rozdílům hodnot mechanických veličin obou zkušebních metod.

I přes rozdílné hodnoty meze kluzu, se s ohledem na jejich zprůměrování, metoda instrumentované tvrdosti osvědčila a jeví se jako dostatečně reprezentativní. Zkoušení materiálů instrumentovanou tvrdostí, je přínosné pro kontrolu i studium konstrukčních materiálů. Velkou výhodou a předností této metody je i to, že jí lze vzhledem k minimálnímu porušení zkušebního vzorku, považovat za téměř nedestruktivní. Pomocí přenosného zkušebního přístroje, lze zkoumat i různá zařízení přímo za provozu. Další výhodou je také v okamžité i průběžné detekci hloubky vtisku a průběžného zatížení, včetně okamžitého rozeznání elastického a plastického chování materiálu. Vzhledem k univerzálnosti metody dané víceúčelovým měřícím přístrojem, lze získat instrumentovanou metodou, také např. lomové charakteristiky materiálu (lomovou houževnatost), což je při zkoumání zařízení pracujících v energetickém průmyslu obzvlášť důležité a přínosné.

Literatura

- [1] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1, 1.díl: Nauka o materiálu*. 3. vyd. Praha: Scientia, 2006. 174 s. ISBN 80-7183-262-6.
- [2] VLK, M., FLORIAN, Z. *Mezní stavy a spolehlivost* [online]. Brno, 2007 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <<http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>>.
- [3] STRNADEL, B. *Nauka o materiálu II: Degradční procesy a design konstrukčních materiálů*. 1.vyd. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2008. 276 s. ISBN 978-80-248-1842-9.
- [4] MATOCHA, K. *Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů*. 1.vyd. Ostrava: VŠB - TU Ostrava; Ostrava: MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., 2010. 73 s. ISBN 978-80-248-2223-5.
- [5] STRNADEL, B. *Řešené příklady a technické úlohy z materiálového inženýrství*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1998. 334 s. ISBN 80-238-3082-1.
- [6] DVOŘÁČEK, O. *Modelování fázového složení žárupevných ocelí a jejich spojů*. Brno, 2009. 77 s. Diplomová práce na fakultě Strojního inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně v ústavu materiálových věd a inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Vít Jan, Ph.D.
- [7] MEYERS, M.A., CHAWLA, K.K. *Mechanical Behavior of Materials (2nd Edition)*. Cambridge University Press, 2009. 880 s. ISBN 978-0-521-86675-0.
- [8] VODÁREK, V. *Metody studia struktury*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2012. 172 s. ISBN 978-80-248-2559-5.
- [9] GREGOR, M. *Tepelné zpracování ručních utahovacích nástrojů*. Brno, 2012. 65 s. Bakalářská práce na fakultě Strojního inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně v ústavu materiálových věd a inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Doležal, Ph.D.

- [10] ČSN 41 5313. *Ocel 15 313 Cr-Mo*. 1979-03-01.
- [11] ČSN 41 5128. *Ocel 15 128 Cr-Mo-V*. 1986-03-01.
- [12] VN 41 5229. *Ocel 15 229 Cr-Mo-V*. 1984-08-01.
- [13] SCHWARZ, D., KOUKAL, J., SONDEL, M. Ověření vlastností svarového spoje ocelí P91 a 15128 po dlouhodobé teplotní expozici. *Konstrukce* [online]. 11.11.2010 [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/overeni-vlastnosti-svaroveho-spoje-oceli-p91-a-15128-po-dlouhodobe-teplotni-expozici>>.
- [14] STRATIL, L. *Vysokoteplotní provozní zkřehnutí oceli Eurofer '97*. Brno, 2009. 58 s. Diplomová práce na fakultě Strojního inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně v ústavu materiálových věd a inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Hynek Hadraba, Ph. D.
- [15] ČSN 41 7341. *Ocel 17 341 Cr-Ni-Mo*. 1982-07-01.
- [16] KABELÁČ, J. *Hodnocení mechanických vlastností vybraných druhů ocelí*. Zlín, 2011. 59 s. Bakalářská práce na fakultě Technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně v ústavu výrobního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Maňas, Ph.D.
- [17] ČSN EN ISO 6892-1 (420310). *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2010-03-01.
- [18] ČSN ISO 148-1 (420381). *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - část 1: Zkušební metoda*. 2010-10-01.
- [19] DUBA, H. *Zkoušky tvrdosti, účel a využití ve strojírenství*. Brno, 2010. 39 s. Bakalářská práce na fakultě Strojního inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně v ústavu strojírenské technologie. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

- [20] ČSN EN ISO 6506-1 (420359). *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*. 2006-09-01.
- [21] FISCHER-CRIPPS, A. C. *Introduction to Contact Mechanics*. New York: Springer - Verlag, 2000. 245 s. ISBN 0-387-98914-5.
- [22] ČSN EN ISO 6508-1 (420360). *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 1: Zkušební metoda (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)*. 2006-09-01.
- [23] ČSN EN ISO 6507-1 (420374). *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. 2006-09-01.
- [24] ČSN EN ISO 4516 (038159). *Kovové a jiné anorganické povlaky - Zkoušky mikrotvrdosti podle Vickerse a podle Knoopu*. 2003-02-01.
- [25] ČSN EN ISO 4545-1 (420376). *Kovové materiály - Zkoušky tvrdosti podle Knoopu - Část 1: Zkušební metoda*. 2006-09-01.
- [26] ISO/TR 29381:2008. *Metallic materials - Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test - Indentation tensile properties*. 2012-09-25.
- [27] ČERNÁ, M. *Tvrdost a mikrotvrdost pevných látek*. Brno, 2011. 39 s. Bakalářská práce na Pedagogické fakultě Masarykovy Univerzity v Brně na katedře fyziky. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. Vlastislav Navrátil, CSc.
- [28] DUŠEK, J. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost - čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. 171 s. Disertační práce na Přírodovědecké fakultě Masarykovy Univerzity v Brně. Školitel disertační práce Prof. RNDr. Vladislav Navrátil, CSc.
- [29] MATHEW, M. D., MURTY, K. L., RAO K. B. S., MANNAN, S. L. *Materials Science and Engineering A264: Ball indentation studies on the effect of aging on mechanical behavior of alloy 625*. Elsevier Science, 1999. s. 159 -166.

- [30] TABOR, D. *The Hardness of Metals*. Oxford : Clarendon Press, 2000. 175 s. ISBN 0-19-850776-3

- [31] HAGGAG, Fahmy M., BYUN, Thak-Snag, HONG, J.H., MIRAGLIA, P.Q., LINGA MURTY, K. *Scripta Meaterialia*, vol. 38, no. 4. Elsevier Science, 1998. s. 645 - 651.

- [32] PHARR, G.M. *Measurement of Mechanical Properties by Ultra-low Load Indentation*. Materials Science and Engineering A253. 1998. s. 151-159.

- [33] LEE, H., LEE, J.H., PHARR, G.M. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids: A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation*. 2005. s. 2037 - 2069.

- [34] Produkty: Tvrdoměry ZHU zwicki-Line pro stanovení univerzální tvrdosti. *Zwick/Roell* [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <<http://www.zwick.cz/cs/produkty/tvrdomery/univerzalni-tvrdost-tvrdomery/zhu-zwicki-line-pro-stanoveni-univerzalni-tvrdosti.html>>.

Seznam použitých symbolů a značek

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Význam</i>
a	[mm]	poloměr kruhového indentoru
A	[%]	tažnost
A_{10}	[%]	tažnost dlouhé kruhové tyče
A_5	[%]	tažnost krátké kruhové tyče
ABI		kuličkový indentační test
A_{tr}	[mm ²]	skutečná plocha trvalého vtisku
D	[mm]	průměr kuličkového indentoru
d	[mm]	průměr vtisku
d_0	[mm]	počáteční průměr
d_p	[mm]	průměr vtisku při plastické deformaci
d_t	[mm]	maximální průměr vtisku
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti
E^*	[GPa]	kombinovaný (efektivní) Youngův modul pružnosti
E_i	[GPa]	elastický modul indentoru
E_{p1}	[J]	původní potenciální energie
E_{p2}	[J]	konečná potenciální energie
E_s	[GPa]	elastický modul zkoušeného materiálu
G	[N]	tíha
g	[s ⁻²]	tíhové zrychlení rovné hodnotě 9,81
H	[-]	tvrdost
h_1	[m]	původní výška
h_2	[m]	konečná výška
HB	[-]	tvrdost podle Brinella
h_c	[mm]	kontaktní hloubka
HK	[-]	tvrdost podle Knoop
HM	[-]	tvrdost podle Meyera
h_{max}	[mm]	maximální indentační hloubka
h_p	[mm]	maximální plastická hloubka
HRA	[-]	tvrdost podle Rockwella - indentor z diamantového kužele, zkouška při P = 600 N

HRB	[-]	tvrdost podle Rockwella - indentor z ocelové kuličky, zkouška při $P = 1000 \text{ N}$
HRC	[-]	tvrdost podle Rockwella - indentor z diamantového kužele, zkouška při $P = 1500 \text{ N}$
HSh	[-]	tvrdost podle Shoreho
h_t	[mm]	maximální indentační hloubka
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
K	[MPa]	pevnostní konstanta
$K(U, V)$	[J]	nárazová práce
$KC(U, V)$	[J/m ²]	vrubová houževnatost
L_0	[mm]	počáteční délka
L_u	[mm]	konečná délka
m	[kg]	hmotnost
M_k	[Nmm]	točivý moment
M_o	[Nmm]	ohybový moment
n	[-]	exponent deformačního zpevnění
P	[N]	zatěžující síla
P_e	[N]	síla na mezi kluzu
P_{LM}	[-]	Larson - Millerův parametr
p_m	[Pa]	střední indentační tlak
P_m	[N]	síla na mezi pevnosti
P_{max}	[N]	maximální zatěžující síla
R	[mm]	poloměr vnikacího tělíska
R_e	[MPa]	mez kluzu
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
S	[mm ²]	průřez tělesa, (kontaktní plocha)
S_{II}	[mm ²]	průřez tělesa rovnoběžný s působící silou
S_0	[mm ²]	počáteční průřez
S_u	[mm ²]	konečný průměr
S_{UTS}	[MPa]	inženýrská mez pevnosti v tahu
T	[°C]	teplota
t	[s]	čas
u	[mm]	délka úhlopříčky
w	[J.m ⁻³]	celková hustota deformační energie

w_e	[J.m ⁻³]	vratná elastická deformační energie
W_k	[mm ³]	modul průřezu v krutu
W_o	[mm ³]	modul průřezu v ohybu
w_p	[J.m ⁻³]	trvalá plastická deformační energie
w_t	[MPa]	houževnatost
Z	[%]	kontrakce (zúžení)
α_m	[-]	materiálový parametr
δ	[-]	nucený faktor
ε	[-]	poměrná deformace (poměrné prodloužení)
$\bar{\varepsilon}$	[-]	skutečná deformace
ε_f	[-]	skutečná deformace do lomu
ε_p	[-]	skutečná plastická deformace
ε_t	[-]	skutečná deformace
ν	[-]	Poissonovo číslo
ν	[m.s ⁻¹]	rychlost
ν_i	[-]	Poissonovo číslo indentoru
ν_s	[-]	Poissonovo číslo zkoušeného materiálu
π	[-]	Ludolfovo číslo rovné hodnotě 3,14
$\bar{\sigma}$	[MPa]	skutečné napětí
σ	[MPa]	tahové smluvní napětí
σ_f	[MPa]	skutečné napětí do lomu
σ_o	[MPa]	ohybové napětí
σ_t	[MPa]	skutečné napětí
σ_δ	[MPa]	jednoosé tokové napětí se započítáním smykové složky
τ	[MPa]	napětí ve střihu či v krutu

Seznam obrázků

Obr.1.	Základní druhy mechanického namáhání [1].	11
Obr.2.	Jednotlivé složky tenzoru napětí působící na sledovaný element [3].	13
Obr.3.	Typické závislosti creepové deformace na čase, kde 1 je primární creep, 2 je sekundární creep a 3 představuje creep terciální [3].	15
Obr.4.	Schéma univerzálního zkušebního stroje.	24
Obr.5.	Tvary zkušebních tyčí pro zkoušku tahem [1].	24
Obr.6.	Průběh tahového diagramu měkké uhlíkové oceli, včetně záznamu tlakového zatížení materiálu [1].	25
Obr.7.	Grafické stanovení $R_{p0,2}$ z pracovního diagramu [1].	26
Obr.8.	Příklady smluvních diagramů různých kovů a slitin [1].	29
Obr.9.	Zkouška tvrdosti podle Brinella [1].	32
Obr.10.	Zkouška tvrdosti podle Vickerse - HV [1].	35
Obr.11.	Geometrie Knoopova indentoru [21].	36
Obr.12.	Typická závislost $P - h$ s vyznačením základních experimentálních veličin indentace [32].	38
Obr.13.	Základní fyzikální veličiny indentační instrumentované zkoušky [32].	38
Obr.14.	Příklad indentační křivky slitiny 625 měřené při pokojové teplotě [32].	39
Obr.15.	Srovnání grafické závislosti napětí - deformace z tahové zkoušky a z indentačního testu ("ABI") [31].	39
Obr.16.	Efekty nahromadění a prohloubení okraje [33].	40
Obr.17.	Tvrdoměr ZHU zwicki-Line (upravený z českých webových stránek firmy Zwick/Roell [34]).	48
Obr.18.	Schematické a reálné znázornění části z K1.	49
Obr.19.	Schematické a reálné znázornění části z K2.	49
Obr.20.	Schematické a reálné znázornění části z K3.	49
Obr.21.	Grafická závislost síla - posuv příčnicku daná tahovou zkouškou pro K1.	52
Obr.22.	Grafická závislost síla - posuv příčnicku daná tahovou zkouškou pro K2.	52
Obr.23.	Grafická závislost síla - posuv příčnicku daná tahovou zkouškou pro K3.	52
Obr.24.	Grafický záznam z průběhu indentačního zatěžování vzorků K1.	53
Obr.25.	Grafický záznam z průběhu indentačního zatěžování vzorků K2.	53
Obr.26.	Grafický záznam z průběhu indentačního zatěžování vzorků K3.	54
Obr.27.	Lineární regresní závislost pro K1.	54

Obr.28.	Lineární regresní závislost pro K2.	55
Obr.29.	Lineární regresní závislost pro K3.	55
Obr.30.	Výsledná grafická napětově - deformační závislost K1, určená instrumentovanou indentační zkouškou.	56
Obr.31.	Výsledná grafická napětově - deformační závislost K2, určená instrumentovanou indentační zkouškou.	56
Obr.32.	Výsledná grafická napětově - deformační závislost K3, určená instrumentovanou indentační zkouškou.	57

Seznam tabulek

Tab.1.	Chemické složení ocelí 15 313 a 15 128.....	19
Tab.2.	Chemické složení oceli P91 a oceli Eurofer 97.....	20
Tab.3.	Chemické složení oceli 17 341.....	21
Tab.4.	Průměrné zjištěné chemické složení K1, K2 a K3 a normované chemické složení oceli 15 128.	50
Tab.5.	Výsledné hodnoty mechanických vlastností, určené tahovými zkouškami pro K1, K2 a K3.	51
Tab.6.	Zprůměrované výsledné hodnoty pevnostních veličin z instrumentované indentační zkoušky.....	57
Tab.7.	Srovnání hodnot mezi kluzu tahové zkoušky a instrumentované indentační metody jednotlivých komponent.	58